

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

2003年 4月 3日

出 願 番 号

Application Number:

特願2003-100442

[ST.10/C]:

[JP2003-100442]

出 願 人

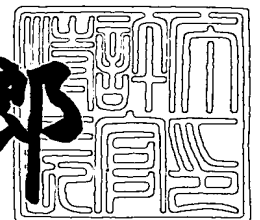
Applicant(s):

株式会社東芝

2003年 4月25日

特 許 庁 長 官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

太田 信一郎



出証番号 出証特2003-3030264

【書類名】 特許願

【整理番号】 APB02Y018

【提出日】 平成15年 4月 3日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H01L 21/26

【発明の名称】 半導体評価装置及び半導体評価方法

【請求項の数】 19

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
横浜事業所内

    【氏名】 坪 晴子

【発明者】

    【住所又は居所】 大分県大分市大字松岡 3 5 0 0 番地 株式会社東芝 大  
分工場内

    【氏名】 村越 篤

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
横浜事業所内

    【氏名】 川瀬 吉正

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
横浜事業所内

    【氏名】 須黒 恭一

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
横浜事業所内

    【氏名】 力丸 勝実

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝

横浜事業所内

【氏名】 島 龍哉

【特許出願人】

【識別番号】 000003078

【氏名又は名称】 株式会社 東芝

【代理人】

【識別番号】 100083806

【弁理士】

【氏名又は名称】 三好 秀和

【電話番号】 03-3504-3075

【選任した代理人】

【識別番号】 100068342

【弁理士】

【氏名又は名称】 三好 保男

【選任した代理人】

【識別番号】 100100712

【弁理士】

【氏名又は名称】 岩▲崎▼ 幸邦

【選任した代理人】

【識別番号】 100100929

【弁理士】

【氏名又は名称】 川又 澄雄

【選任した代理人】

【識別番号】 100108707

【弁理士】

【氏名又は名称】 中村 友之

【選任した代理人】

【識別番号】 100095500

【弁理士】

【氏名又は名称】 伊藤 正和

【選任した代理人】

【識別番号】 100101247

【弁理士】

【氏名又は名称】 高橋 俊一

【選任した代理人】

【識別番号】 100098327

【弁理士】

【氏名又は名称】 高松 俊雄

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 001982

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 半導体評価装置及び半導体評価方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を出力するポンプレーザと、

プローブ光を前記半導体ウェハへ照射するプローブレザと、

前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光を検出する検出器

とを有することを特徴とする半導体評価装置。

【請求項 2】 前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光を、前記ポンプ光の変調周波数で同期増幅するロックインアンプを更に有することを特徴とする請求項 1 記載の半導体評価装置。

【請求項 3】 前記半導体ウェハとは異なる他の半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための予備ポンプ光を前記他の半導体ウェハへ照射する予備レーザを更に有することを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の半導体評価装置。

【請求項 4】 前記プローブ光の光路上に配置された、前記半導体ウェハの表面と同等な反射率を有する反射体を更に有することを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の半導体評価装置。

【請求項 5】 半導体ウェハの表面に介在する固定電荷を少なくする段階と、  
前記半導体ウェハにイオンを注入する段階と、  
プローブ光及び前記半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を前記半導体ウェハへ照射しながら、前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度を測定する段階  
とを有することを特徴とする半導体評価方法。

【請求項 6】 前記半導体ウェハの表面に介在する固定電荷を少なくする段階は、前記半導体ウェハ内の結晶欠陥を水素原子で終端させる処理であることを特徴とする請求項 5 記載の半導体評価方法。

【請求項 7】 前記半導体ウェハの表面に介在する固定電荷を少なくする段階は、前記半導体ウェハの表面を希フッ酸溶液にさらす処理であることを特徴と

する請求項 5 記載の半導体評価方法。

【請求項 8】 前記固定電荷を少なくする段階の後、前記半導体ウェハにイオンを注入する段階の前に、前記半導体ウェハの表面に絶縁膜を形成する段階を更に有することを特徴とする請求項 5 乃至 7 の何れか 1 項記載の半導体評価方法。

【請求項 9】 機械走査型のイオン注入装置が有するホイールの回転軸に対して実質的に平行な方向から、前記ホイール上に載置された半導体ウェハにイオンを注入する段階と、

プローブ光及び前記半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を前記半導体ウェハへ照射しながら、前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度を測定する段階

とを有することを特徴とする半導体評価方法。

【請求項 10】 前記イオン注入装置の構造上、前記回転軸に対して実質的に平行な方向からイオンを注入することができない場合、前記構造が許す限り前記回転軸とイオンを注入する方向との成す角を小さくすることを特徴とする請求項 9 記載の半導体評価方法。

【請求項 11】 半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を前記半導体ウェハへ照射する段階と、

プローブ光を前記半導体ウェハへ照射する段階と、

前記ポンプ光を 3 秒間以上前記半導体ウェハへ照射した後に、前記ポンプ光及びプローブ光を前記半導体ウェハへ照射しながら、前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度を測定する段階

とを有することを特徴とする半導体評価方法。

【請求項 12】 半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を前記半導体ウェハへ照射する段階と、

プローブ光を前記半導体ウェハへ照射する段階と、

前記ポンプ光及びプローブ光を前記半導体ウェハへ照射しながら、前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度を測定する段階と、

前記プローブ光を前記半導体ウェハへ照射していない時に、前記半導体ウェハ

により反射された前記プローブ光と同じ光路上に、前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光と同等な光を発生させる段階

とを有することを特徴とする半導体評価方法。

【請求項 1 3】 前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光と同じ光路上に、前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光と同等な光を発生させる段階は、前記半導体ウェハの表面と同等な反射率を有する反射体に前記プローブ光を照射する段階であることを特徴とする請求項 1 2 記載の半導体評価方法。

【請求項 1 4】 半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を前記半導体ウェハへ照射する段階と、

プローブ光を前記半導体ウェハへ照射する段階と、

前記ポンプ光及びプローブ光を前記半導体ウェハへ照射しながら、前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度を測定する段階と、

前記半導体ウェハにイオンを注入した後から前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度を測定するまでの第 1 の経過時間に対する前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度の変化を示す第 1 の関数形を求める段階と、

前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度、前記第 1 の経過時間、及び前記第 1 の関数形を用いて、前記半導体ウェハにイオンを注入した直後の前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度を求める段階

とを有することを特徴とする半導体評価方法。

【請求項 1 5】 前記プローブ光を前記半導体ウェハへ照射し始めてから前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度を測定するまでの第 2 の経過時間に対する前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度の変化を示す第 2 の関数形を求める段階と、

前記第 2 の関数形から、前記プローブ光を前記半導体ウェハへ照射し始めた直後の前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度を求める段階とを更に有し、

前記半導体ウェハにイオンを注入した直後の前記半導体ウェハにより反射され

た前記プローブ光の強度を求める段階は、前記プローブ光を前記半導体ウェハへ照射し始めた直後の前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度、前記第 1 の経過時間、及び前記第 1 の関数形を用いて、実施することを特徴とする請求項 1 4 記載の半導体評価方法。

【請求項 1 6】 前記第 1 の関数形は、前記第 1 の経過時間の対数を含む複数の項を足し合わせるにより表されることを特徴とする請求項 1 4 記載の半導体評価方法。

【請求項 1 7】 前記第 2 の関数形は、前記第 2 の経過時間の対数を含む複数の項を足し合わせるにより表されることを特徴とする請求項 1 5 記載の半導体評価方法。

【請求項 1 8】 半導体ウェハにイオンを注入する段階と、  
プローブ光及び前記半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を前記半導体ウェハへ照射しながら、前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度を測定する段階と、

前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度のうち、前記ポンプ光の変調周波数の 2 倍の周波数の成分を選択的に取り出す段階と、

前記ポンプ光の変調周波数の 2 倍の周波数の成分と基準変調との位相ずれを測定する段階と、

前記位相ずれに基づいて、前記半導体ウェハの最表面がアモルファス化しているか否かを判断する段階

とを有することを特徴とする半導体評価方法。

【請求項 1 9】 半導体ウェハにイオンを注入する段階と、  
プローブ光及び前記半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を前記半導体ウェハへ照射しながら、前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度を測定する段階と、

前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度の前記ウェハ面内での分布を測定する段階と、

前記半導体ウェハにより反射された前記プローブ光の強度の前記ウェハ面内での分布に基づいて、前記半導体ウェハの最表面がアモルファス化しているか否か



を判断する段階

とを有することを特徴とする半導体評価方法。

【発明の詳細な説明】

【 0 0 0 1 】

【発明の属する技術分野】

本発明は、半導体評価装置及び半導体評価方法に係り、特に、イオン注入処理を含む半導体基板の処理により生じる半導体基板内の結晶欠陥を介して半導体基板の処理を評価する半導体評価装置及び半導体評価方法に係る。

【 0 0 0 2 】

【従来の技術】

半導体ウェハ上に集積回路を形成する一連の製造工程には、通常、電荷をおびた原子或いは分子を半導体ウェハ中に打ち込むイオン注入工程が含まれる。イオン注入に伴い、注入イオンと半導体ウェハ中の結晶格子とが衝突し、半導体ウェハ内に格子間原子や原子空孔などの点欠陥が発生する。イオン注入前後の結晶状態の変化から、半導体ウェハの様々な特性を評価する従来技術が知られている（例えば、特許文献 1、2 参照。）。

【 0 0 0 3 】

この従来技術では、半導体のバンドギャップエネルギー幅と同等或いはこれよりも大きなエネルギーを持つポンプ光を半導体ウェハに照射する。半導体ウェハに吸収されるポンプ光の光子は、一对の正孔及び電子からなる光キャリアを生成する。光キャリアが再結合するまでの過程を半導体ウェハにおいて反射したプローブ光を介して読み取る。光キャリアを含む過剰キャリアの再結合までの過程は、半導体ウェハの結晶状態に依存するため、半導体ウェハ中に注入された不純物のドーズ量、プリアモルファス領域の深さ、アニール処理後の接合深さを読み出すことができる。

【 0 0 0 4 】

【特許文献 1】

米国特許第 6 0 4 9 2 2 0 号明細書

【 0 0 0 5 】

【特許文献 2】

米国特許第 6 3 2 3 9 5 1 B 1 号明細書

【0 0 0 6】

【発明が解決しようとする課題】

ポンプ光を照射した後、過剰キャリアは一定の時定数をもって再結合する。しかし、ポンプ光の照射によって半導体ウェハ中の点欠陥は動いたり消滅したりする。よって、この点欠陥の空間分布や密度分布が測定中に変化してしまい、過剰キャリアの再結合過程に影響を与える。その結果、測定時間に応じて反射プローブ光の強度が変化して、半導体特性を正確に測定することが困難となる。特に、半導体ウェハ中に光キャリアを励起するポンプ光の変調周波数が、k H z オーダである場合は、この問題が顕著である。

【0 0 0 7】

また、半導体ウェハ表面にケミカルオキサイド等の固定電荷の多い膜が介在する場合、反射ポンプ光の強度や位相には、固定電荷の多い膜によって数 1 0 % のばらつきが生じてしまう。

【0 0 0 8】

本発明はこのような従来技術の問題点を解決するために成されたものであり、その目的は、高い測定精度及び測定再現性を成し得る半導体評価装置及び半導体評価方法を提供することである。

【0 0 0 9】

【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するため、本発明の第 1 の特徴は、半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を出力するポンプレーザと、プローブ光を半導体ウェハへ照射するプローブレザと、半導体ウェハにより反射されたプローブ光を検出する検出器とを有する半導体評価装置であることを要旨とする。

【0 0 1 0】

本発明の第 2 の特徴は、半導体ウェハの表面に介在する固定電荷を少なくする段階と、半導体ウェハにイオンを注入する段階と、プローブ光及び半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を半導体ウェハへ照射しな

がら、半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度を測定する段階とを有する半導体評価方法であることを要旨とする。

【 0 0 1 1 】

本発明の第 3 の特徴は、機械走査型のイオン注入装置が有するホイールの回転軸に対して実質的に平行な方向から、ホイール上に載置された半導体ウェハにイオンを注入する段階と、プローブ光及び半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を半導体ウェハへ照射しながら、半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度を測定する段階とを有する半導体評価方法であることを要旨とする。

【 0 0 1 2 】

本発明の第 4 の特徴は、半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を半導体ウェハへ照射する段階と、プローブ光を半導体ウェハへ照射する段階と、ポンプ光を 3 秒間以上半導体ウェハへ照射した後に、ポンプ光及びプローブ光を半導体ウェハへ照射しながら、半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度を測定する段階とを有する半導体評価方法であることを要旨とする。

【 0 0 1 3 】

本発明の第 5 の特徴は、半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を半導体ウェハへ照射する段階と、プローブ光を半導体ウェハへ照射する段階と、ポンプ光及びプローブ光を半導体ウェハへ照射しながら、半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度を測定する段階と、プローブ光を半導体ウェハへ照射していない時に、半導体ウェハにより反射されたプローブ光と同じ光路上に、半導体ウェハにより反射されたプローブ光と同等な光を発生させる段階とを有する半導体評価方法であることを要旨とする。

【 0 0 1 4 】

本発明の第 6 の特徴は、半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を半導体ウェハへ照射する段階と、プローブ光を半導体ウェハへ照射する段階と、ポンプ光及びプローブ光を半導体ウェハへ照射しながら、半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度を測定する段階と、半導体ウェハにイ

オンを注入した後から半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度を測定するまでの第1の経過時間に対する半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度の変化を示す第1の関数形を求める段階と、半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度、第1の経過時間、及び第1の関数形を用いて、半導体ウェハにイオンを注入した直後の半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度を求める段階とを有する半導体評価方法であることを要旨とする。

## 【0015】

本発明の第7の特徴は、半導体ウェハにイオンを注入する段階と、プローブ光及び半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を半導体ウェハへ照射しながら、半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度を測定する段階と、半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度のうち、ポンプ光の変調周波数の2倍の周波数の成分を選択的に取り出す段階と、ポンプ光の変調周波数の2倍の周波数の成分と基準変調との位相ずれを測定する段階と、位相ずれに基づいて、半導体ウェハの最表面がアモルファス化しているか否かを判断する段階とを有する半導体評価方法であることを要旨とする。

## 【0016】

本発明の第8の特徴は、半導体ウェハにイオンを注入する段階と、プローブ光及び半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を半導体ウェハへ照射しながら、半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度を測定する段階と、半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度のウェハ面内での分布を測定する段階と、半導体ウェハにより反射されたプローブ光の強度のウェハ面内での分布に基づいて、半導体ウェハの最表面がアモルファス化しているか否かを判断する段階とを有する半導体評価方法であることを要旨とする。

## 【0017】

## 【発明の実施の形態】

以下図面を参照して、本発明の実施の形態を説明する。図面の記載において同一あるいは類似の部分には同一あるいは類似な符号を付している。

## 【0018】

図1に示すように、本発明の実施の形態に係るイオン注入装置は、複数枚の半

導体ウェハ（以後、「ウェハ」と略す）1が載置されるホイール4と、ウェハ1に注入するイオンを生成するイオン源3とを有する。ホイール4は、回転軸5に沿って回転する底が平坦な鍋状の形状をなしている。鍋の側壁となるホイール4の外周部分は、図1の断面図上では、回転軸5に垂直な面に対して一定の角度 $\alpha$ をもって傾斜している。ウェハ1は、ホイール4の傾斜した外周部分に沿って複数枚載置されている。イオン源3から射出されたイオンは、均一な速度及び方向性を有するイオンビーム2としてウェハ1に打ち込まれる。図1に示すイオン注入装置は、ウェハ1が載置されたホイール4を回転させることで多数のウェハ1全体に均一にイオンを注入する機械走査（メカニカルスキャン）型の装置である。

#### 【0019】

イオンビーム2とホイール4の回転軸5は実質的に平行である。ここで、「実質的に平行」には、イオンビーム2とホイール4の回転軸5とが平行である場合と、イオンビーム2とホイール4の回転軸5とがなす角度が2.5度以下である場合とが含まれる。なお、角度 $\alpha$ は、イオンビーム2の加速エネルギー、ウェハ1の結晶面、イオン種、チャネリング条件などに基づいて定められる。

#### 【0020】

図1に示したイオン注入装置によりイオン注入処理が施されたウェハ1は、図2に示す半導体評価装置により、ドーズ量、イオン注入深さ、プレアモルファス層の厚さ、接合深さ、結晶欠陥密度等のウェハ1の様々な特性が評価される。半導体評価装置は、図1に示した複数枚のウェハ1のうちの1枚のウェハ1が載置されるステージ10と、ウェハ1に照射されるポンプ光25を生成するポンプレーザ11と、ウェハ1に照射されるプローブ光26を生成するプローブレザ12と、ウェハ1の表面及びその内部で反射されるポンプ光（以後、「反射ポンプ光」という）27を吸収し、ウェハ1の表面及びその内部で反射されるプローブ光（以後、「反射プローブ光」という）28を透過させるフィルタ16と、フィルタ16を透過した反射プローブ光28を検出する検出器13と、ポンプ光25及びプローブ光26を同軸上に配置させる為にプローブ光26を反射させる第1のハーフミラー14と、反射プローブ光28を検出器13へ導く為に反射プローブ

光 2 8 を反射させる第 2 のハーフミラー 1 5 と、ポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 をウェハ 1 表面にて結像させる対物レンズ 1 7 と、ステージ 1 0、ポンプレーザ 1 1、プローブレーザ 1 2、フィルタ 1 6、検出器 1 3、第 1 及び第 2 のハーフミラー 1 4、1 5、及び対物レンズ 1 7 を収納したチャンバ 1 8 と、チャンバ 1 8 の一部に取り付けられたロードポート 1 9 と、ポンプレーザ 1 1 に接続されたポンプレーザ用電源 2 0 と、ポンプレーザ用電源 2 0 及び検出器 1 3 に接続されたロックインアンプ 2 1 と、ロックインアンプ 2 1 に接続された計算機 ( P C ) 2 2 とを有する。

## 【 0 0 2 1 】

ポンプレーザ 1 1 から射出されたポンプ光 2 5 は、第 1 及び第 2 のハーフミラー 1 4、1 5 及び対物レンズ 1 7 を通過してウェハ 1 上に照射される。ポンプレーザ 1 1 は、ポンプ光 2 5 の強度に一定周期で変調をかける。プローブレーザ 1 2 から射出されたプローブ光 2 6 の一部は、第 1 のハーフミラー 1 4 により反射され、対物レンズ 1 7 を通過してウェハ 1 上に照射される。プローブレーザ 1 2 は、一定の強度を有するプローブ光 2 6 を生成し、プローブ光 2 6 の強度に変調をかけない。反射ポンプ光 2 7 の一部は、第 2 のハーフミラー 1 5 により反射され、フィルタ 1 6 に吸収される。反射プローブ光 2 8 の一部は、第 2 のハーフミラー 1 5 により反射され、フィルタ 1 6 を通過し、検出器 1 3 で検出される。検出器 1 3 は、反射プローブ光 2 8 を電気信号 ( シグナル ) に変換してロックインアンプ 2 1 に送信する。検出器 1 3 の出力となるシグナルの強度は、反射プローブ光 2 8 の強度に対応する。

## 【 0 0 2 2 】

ポンプレーザ用電源 2 0 は、ポンプレーザ 1 1 の動作に必要な電力及びポンプ光 2 5 の強度の変調周期を示す変調周波数をポンプレーザ 1 1 へ供給する。ロックインアンプ 2 1 は、検出器 1 3 から供給されるシグナルをポンプレーザ用電源 2 0 から供給されるポンプ光 2 5 の強度の変調周波数で同期増幅 ( ロックイン増幅 ) して、その出力を計算機 2 2 に送信する。計算機 2 2 は、ロックイン増幅されたシグナルの強度を補正してイオン注入直後のシグナルの強度を求める。チャンバ 1 8 は、光学測定に不要な光ノイズを遮断する。ロードポート 1 9 は、測定

対象のウェハ 1 をチャンバ 1 8 に搬入及び搬出する際に使用される。

### 【 0 0 2 3 】

図 3 に示すように、ポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 は、ステージ 1 0 上に載置されたウェハ 1 の照射領域 3 0 に照射される。ポンプレーザ 1 1、プローブレザ 1 2、フィルタ 1 6、検出器 1 3、第 1 及び第 2 のハーフミラー 1 4、1 5、及び対物レンズ 1 7 は、チャンバ 1 8 に対して固定されている。ステージ 1 0 は、ポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 の光軸に垂直な面内において互いに直行する  $x-y$  方向にそれぞれ移動可能である。ステージ 1 0 を移動させることで、ステージ 1 0 の任意の領域を照射領域 3 0 とすることが出来る。

### 【 0 0 2 4 】

次に、図 4 乃至図 6 を参照して、図 2 及び図 3 に示した半導体評価装置の測定原理について説明する。図 4 に示すように、例えば、ポンプ光 2 5 として、変調周波数が 2 k H z であって波長  $\lambda_1$  が 8 3 0 n m のレーザ光をウェハ 1 の表面 4 1 に照射する。また、プローブ光 2 6 として、強度変調がなく波長  $\lambda_2$  が 9 8 0 n m のレーザ光をウェハ 1 の表面 4 1 に照射する。ポンプ光 2 5 は、約 1. 5 e V の光子エネルギーを持ち、プローブ光 2 6 は、約 1. 2 6 e V の光子エネルギーを持ち、いずれも単結晶シリコン (S i) のバンドギャップエネルギー幅 (1. 1 2 e V) よりも大きい。ポンプ光 2 5 は、単結晶シリコン (S i) からなるウェハ 1 中を 1 4  $\mu$  m 通過すると、その強度が  $1/e$  倍 (約 0. 3 7 倍) になる。一方、ポンプ光 2 5 より光子エネルギーの小さいプローブ光 2 6 は、ウェハ 1 の中を 6 5  $\mu$  m 通過すると、その強度が  $1/e$  倍になる。通常、プローブ光 2 6 は、ウェハ 1 の表面 4 1 からイオン注入領域 4 0 を 1  $\mu$  m の深さまで進んでも、その強度は 1. 5 % しか減衰しない。一方、ポンプ光 2 5 は、ウェハ 1 の表面 4 1 からイオン注入領域 4 0 を 1  $\mu$  m の深さまで進むと、その強度は 7 % 減衰し、減衰したポンプ光 2 5 はウェハ 1 に吸収される。上述したように、ポンプ光 2 5 の光子エネルギーは、シリコンのバンドギャップエネルギーより大きいため、ウェハ 1 に吸収されるポンプ光 2 5 は、ウェハ 1 中に 1 対の電子・正孔から成る過剰キャリアを励起する。以後、ポンプ光 2 5 によりウェハ 1 内に励起される過剰キャリアを「光キャリア」と呼ぶ。このように、ウェハ 1 を構成する半導体材料のバンドギャ

ップ幅と同等或いはバンドギャップ幅よりも大きな光子エネルギーを持つポンプ光 2 5 をウェハ 1 に照射する。ウェハ 1 が吸収するポンプ光 2 5 は、ウェハ 1 中に光キャリアを励起する。

## 【 0 0 2 5 】

イオン注入によって結晶構造が損傷を受けたり改質しているイオン注入領域 4 0 では、結晶性が悪い。よって、光キャリアを含むウェハ 1 中の過剰キャリアが消滅するまでの時間（ライフタイム）は比較的短く、過剰キャリアは直ぐに再結合してしまう。一方、イオン注入領域 4 0 よりも深い注入イオンが届かない領域では、結晶性が良い。よって、過剰キャリアのライフタイムは比較的長く、過剰キャリアの密度は高い。したがって、ポンプ光 2 5 の照射により、過剰キャリアの分布がイオン注入領域 4 0 と非注入領域 4 3 との境界面 4 2 を境に急激に変化する。光学的には境界面 4 2 を境に光の屈折率が急激に変化することになり、屈折率の変化率が極大になる領域で、プローブ光 2 6 の反射率が局所的に増大する。したがって、ウェハ 1 に照射されるプローブ光 2 6 は、ウェハ 1 の表面 4 1 及び境界面 4 2 においてそれぞれ反射される。即ち、反射プローブ光 2 8 には、ウェハ 1 の表面 4 1 における「第 1 の反射光」、イオン注入領域 4 0 との境界面 4 2 における「第 2 の反射光」が含まれる。

## 【 0 0 2 6 】

第 1 の反射光と第 2 の反射光とは互いに干渉し合う。よって、反射プローブ光 2 8 は、ポンプ光 2 5 の位相に対してずれた位相を持つ。反射プローブ光 2 8 は、第 2 のハーフミラー 1 5 により検出器 1 3 へその向きを変えられ、検出器 1 3 によりシグナルに変換される。

## 【 0 0 2 7 】

シグナルの強度は、イオン注入によって生じる結晶欠陥の密度分布、注入イオンの密度分布によって異なる。この現象を利用して、例えばイオン注入のドーズ量とシグナルとの関係を求め、シグナルをイオン注入のドーズ量に焼き直す。このようにして、注入イオンのドーズ量、イオン注入の深さ、プレアモルファス層の厚さ、熱処理後の p n 接合の深さ、結晶欠陥密度等のウェハ 1 の特性が評価することが出来る。このように、ポンプ光 2 5 により誘起される光キャリアの再結



合までの過程を、反射プローブ光 28 を介して読み出す。光キャリアの再結合までの過程は、ウェハ 1 中の結晶状態に依存したものであるため、ウェハ 1 中に導入された不純物、アモルファス領域の深さ、接合深さなどの情報を読み出すことができる。

## 【0028】

ウェハ 1 の内部にある境界面 42 で反射する第 2 の反射光の強度は、ウェハ 1 の表面 41 で反射する第 1 の反射光の強度に比べて小さい。ポンプ光 25 を一定の強度で照射し続けた場合、ウェハ 1 の表面 41 で反射する第 1 の反射光及び境界面 42 で反射する第 2 の反射光も一定の強度を保つが、ウェハ 1 の境界面 42 で反射する第 2 の反射光の変化を測定することはほとんど不可能である。

## 【0029】

そこで、図 5 に示すようにウェハ 1 に照射されるポンプ光 25 の強度に、時間的に一定な直流成分の他に時間的に変化する変調成分を加える。すると、過剰キャリアの生成も時間を追って変化する。反射プローブ光 28 の強度は、ポンプ光 25 の変調周期と同じ周期をもって変化する。過剰キャリアの発生状況に応じた位相を有する。ポンプ光 25 の変調周期に同期した反射プローブ光 28 の変化をロックイン増幅して読み取ることによって、光キャリアの発生状況に起因するシグナルを、その他の反射プローブ光 28 の成分から区別して抽出することが可能になる。

## 【0030】

図 6 を参照して、断面積  $A$  を有する  $p$  型単結晶シリコンから成る半導体電流路 50 において発生した過剰キャリア 51a、51b、52a、52b の挙動を説明する。半導体電流路 50 の両端に電圧  $V$  を印加した場合の電子による電流密度  $J_n(x)$  は、(1) 式により表される。(1) 式において、 $q$  は電子の電荷量、 $\mu_n$  は電子のホール係数、 $N_p$  は半導体電流路 50 の伝導帯中の電子密度、 $E$  は電場 ( $E = \partial V / \partial x$ )、 $D_n$  は電子の拡散係数をそれぞれ示す。

## 【0031】

$$J_n(x) = q \mu_n N_p E + q D_n (\partial N_p / \partial x) \quad \dots (1)$$

単位体積 ( $A dx$ ) 当りの電子密度の時間変化は (2) 式により表される。(

2) 式において、 $G_n$ は正孔51a、51b及び電子52a、52bの生成率、 $R_n$ は正孔51a、51b及び電子52a、52bの再結合率をそれぞれ示す。

【0032】

【数1】

$$\frac{\partial N_p}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + (G_n - R_n) \quad \dots (2)$$

今、電場が存在しない場合 ( $E=0$ )、(1)式の右辺の第1項が無視できる。(1)式の右辺を(2)式の右辺の第1項に代入することにより、(3)式が得られる。(3)式において、 $N_{p0}$ はポンプ光25が照射されていないときの電子密度、 $\tau_n$ はp型単結晶シリコンにおける電子52a、52bのライフタイムをそれぞれ示す。

【0033】

【数2】

$$\frac{\partial N_p}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 N_p}{\partial x^2} + G_n - \frac{N_p - N_{p0}}{\tau_n} \quad \dots (3)$$

ここで、電子密度が角周波数 $\omega$ で変化している場合、(3)式は、(4)式に変形することが出来る。

【0034】

【数3】

$$\frac{\partial^2 N_p}{\partial x^2} - N_p \left( \frac{1}{D_n \tau_n} + i \frac{\omega}{D_n} \right) + \left( \frac{G_n}{D_n} + \frac{N_{p0}}{D_n \tau_n} \right) = 0 \quad \dots (4)$$

電子52a、52bのライフタイム $\tau_n$ は約 $1.0 \mu s$ であり、ライフタイム $\tau_n$ の逆数は、 $1/\tau_n = 1 \text{ MHz}$ となる。ポンプ光25の変調周波数 $\omega/2\pi$ が $2 \text{ kHz}$ である場合、ライフタイム $\tau_n$ の逆数は、ポンプ光25の変調周波数に比べて充分大きくなる。したがって、(4)式において右辺の第3項目の寄与はほとんどなく、過剰キャリアの空間分布は時間的に変化しない定常状態の分布になる。一方、ポンプ光25の変調周波数が、 $1 \text{ MHz}$ 程度である場合、(4)

式の右辺の 3 項目及び 4 項目は、過剰キャリアの空間分布を決めるのに同等の寄与をすることになり、過剰キャリアの空間分布は時間的に変化することになる。

## 【 0 0 3 5 】

以後、ポンプ光 2 5 の変調周波数  $\omega / 2 \pi$  を、電子 5 2 a、5 2 b のライフタイム  $\tau_n$  に対して無視できる程に小さく設定する方法を第 1 の半導体評価方法といい、ポンプ光 2 5 の変調周波数  $\omega / 2 \pi$  を、電子 5 2 a、5 2 b のライフタイム  $\tau_n$  に対して同程度に設定する方法を第 2 の半導体評価方法という。本発明の実施の形態は、主として第 1 の半導体測定評価方法について適用することが望ましい。しかし、第 1 の半導体評価方法に限定されるものではなく、第 2 の半導体評価方法についても適用することが出来る場合がある。

## 【 0 0 3 6 】

図 7 を参照して、図 2 に示した計算機 2 2 について説明する。計算機 2 2 は、図 2 のロックインアンプ 2 1 から供給されるシグナルを補正する機能を備えた演算部 6 0 と、演算部 6 0 に接続された第 1 の関数形データベース 6 1、検出信号記憶部 6 2 及びプログラム記憶部 6 3 とを少なくとも有する。

## 【 0 0 3 7 】

演算部 6 0 は、通常のコンピュータシステムの中央処理装置 (CPU) の一部を構成する。なお、図示は省略するが、演算部 6 0 には、シグナルを補正する為のコンピュータ読み取り可能なプログラム、及び演算部 6 0 が処理するデータを一時的に記憶する主記憶装置が接続されている。第 1 の関数形データベース 6 1、検出信号記憶部 6 2 及びプログラム記憶部 6 3 は、それぞれ、半導体 ROM、半導体 RAM 等の半導体メモリ装置、磁気ディスク装置、磁気ドラム装置、磁気テープ装置などの補助記憶装置で構成してもよく、CPU の内部の主記憶装置の一部で構成しても構わない。演算部 6 0 は、入出力制御部 6 4 を介して操作者からのデータや命令などの入力を受け付ける入力装置 6 5、及び補正後のシグナルを出力する出力装置 6 6 に接続されている。入力装置 6 5 は、バーコード入力装置、キーボード、マウス、ライトペン又はフレキシブルディスク装置から構成されている。出力装置 6 6 は、ディスプレイ装置やプリンタ装置から構成されている。

## 【0038】

第1の関数形データベース61は、イオン注入後の経過時間に対するシグナルの強度の変化を示す第1の関数形を記憶する。第1の関数形については図8を参照して後述する。検出信号記憶部62は、図2のロックインアンプ21から送信されたシグナル、ポンプ光25の照射開始から反射プローブ光28の強度を測定するまでの経過時間、及びイオン注入後から反射プローブ光28の強度を測定するまでの経過時間に関する情報を記憶する。プログラム記憶部63は、演算部60で実行される各処理のプログラム命令を記憶する。演算部60は、検出信号記憶部62に記憶された情報を下に第1の関数形データベース61に記憶された第1の関数形を用いて、イオン注入直後のシグナルの強度を求める。

## 【0039】

第1の関数形データベース61に記憶されている第1の関数形 $f_1$ は、一般的に図8に示すようなプロファイルを有する。横軸はイオン注入後からの経過時間を示し、縦軸はシグナルの強度を示す。シグナルの強度は、イオン注入後から時間の経過と共に減少する。具体的には、シグナルの強度は、イオン注入直後、比較的急激に減少するが、イオン注入後の経過時間が長くなると安定する。図8に示した第1の関数形 $f_1$ は、第1の関数形データベース61に記憶されている第1の関数形の一例を示したものであり、第1の関数形のプロファイルは、イオン注入条件或いはポンプ光25及びプローブ光26の照射時間によって変化する。シグナル $S_{ga_1}$ は、時刻 $t_1$ において測定された実測値である。シグナル $S_{ga_0}$ は、演算部60が補正したイオン注入直後のシグナルの予測値である。

## 【0040】

第1の関数形 $f_1$ は、イオン注入後からの経過時間の対数を含む複数の項を足し合わせることで(5)式のように表わされる。(5)式において、 $f_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_k$ 、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_k$ は、それぞれ補正係数を示す。図2に示す半導体評価装置を用いて、イオン注入後からの複数の経過時間においてシグナルを測定することで、各補正係数が求められる。イオン注入条件或いはポンプ光25及びプローブ光26の照射時間などによって、第1の関数形 $f_1$ の各補正係数は変化する。なお、関数形 $f_1$ は、通常、(5)式右辺の第1項乃至第3項だけを用いて

十分に表わすことができ、第 4 項は必要に応じて追加すればよい。

【0041】

$$f1 = f0 + C_1 \exp(-t / \tau_1) + C_2 \exp(-t / \tau_2) + \Sigma C_k \exp(-t / \tau_k) \quad \dots (5)$$

次に、本発明の実施の形態に係る半導体ウェハの処理及び評価の手順を図 9 乃至図 11 を参照して説明する。

【0042】

(イ) 先ず、図 9 の S10 段階において、ウェハ 1 に対してイオン注入処理を施す前に前処理工程を実施する。前処理工程については、図 10 を参照して後述する。

【0043】

(ロ) 次に、S20 段階において、図 1 に示した機械走査型のイオン注入装置を用いて、ウェハ 1 に対してイオンを注入する。被検査工程の一例としてイオン注入工程を実施する際、イオン注入の条件に応じてイオン注入角度を適切に選択して、ホイール 4 の回転軸 5 に対して実質的に平行な方向のイオンビーム 2 を注入する。

【0044】

(ハ) 最後に、S30 段階において、被検査工程 (S20) に関するウェハ 1 の特性を評価する検査工程を実施する。検査工程には、図 2 に示した半導体評価装置の光学系を用いて、シグナルを測定する過程 (S30a) と、測定したシグナルを計算機 22 を用いて補正する過程 (S30b) とが含まれる。シグナルを測定する過程 (S30a) については、図 11 を参照して後述する。シグナルを計算機 22 を用いて補正する過程 (S30b) については、図 12 を参照して後述する。

【0045】

図 10 に示すように、図 9 の前処理工程 (S10) には、ウェハ 1 の最表面に介在する固定電荷を少なくする処理 (S100) が含まれる。固定電荷には、ケミカルオキサイドが含まれる。固定電荷を少なくする処理 (S100) は、例えば、ウェハ 1 の表面に対する希フッ酸溶液によるウェット処理、またはウェハ 1

内の結晶欠陥を水素（H）原子で終端させる処理である。具体的には、ウェハ 1 の表面を希フッ酸溶液にさらすことで、ウェハ 1 の最表層に介在する固定電荷が多い膜を除去する。また、ウェハ 1 内の結晶欠陥を水素原子で終端させるには、水素雰囲気中でウェハ 1 を高温に放置すれば、ウェハ 1 の表面を含むイオンが注入されるべき領域に存在する結晶欠陥を、水素原子でターミネートすることが出来る。

## 【 0 0 4 6 】

（シグナルを測定する過程）

ここで、図 9 の S 3 0 a で示したシグナルを測定する過程について、図 1 1 の S 3 0 0 ～ S 3 0 3 段階により説明する。

## 【 0 0 4 7 】

（A）先ず S 3 0 0 段階において、ウェハ 1 を図 2 のロードポート 1 9 からチャンバ 1 8 内に搬入する。

## 【 0 0 4 8 】

（B）次に S 3 0 1 段階において、ステージ 1 0 上にウェハ 1 を載置する。

## 【 0 0 4 9 】

（C）次に S 3 0 2 段階において、ポンプレーザ 1 1 及びプローブレザ 1 2 を駆動して、ウェハ 1 表面の所望の領域にポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 を照射する。

## 【 0 0 5 0 】

（D）最後に S 3 0 3 段階において、ポンプ光 2 5 を 3 秒間以上照射した後、ウェハ 1 表面にポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 を照射しながら、検出器 1 3 及びロックインアンプ 2 1 を用いて反射プローブ光の強度を測定する。

## 【 0 0 5 1 】

（シグナルを補正する過程）

次に、図 9 の S 3 0 b に示すシグナルを補正する過程について、S 3 8 0 段階及び S 3 8 1 段階を用いて説明する。

## 【 0 0 5 2 】

（a）S 3 8 0 段階において、予め、図 8 に示した第 1 の関数形  $f_1$  を求める

。具体的には、イオン注入後から複数の経過時間において図2に示す半導体評価装置を用いてシグナルを測定する。複数のシグナルの測定値に対して(5)式に示す第1の関数形  $f_1$  をフィッティングすることで、(5)式の各補正係数を求める。そして、求めた第1の関数形  $f_1$  を、第1の関数形データベース61内に記憶する。

## 【0053】

(b) S381段階において、図8のシグナル  $S_{ga1}$  の強度、イオン注入後の時刻  $t_1$  までの経過時間及び第1の関数形  $f_1$  を用いて、イオン注入直後のシグナル  $S_{ga0}$  の強度を求める。

## 【0054】

上述した図10の前処理工程(S100)を実施することにより、ウェハ1の表面を固定電荷の少ない状態にして図9の検査工程(S30)を実施することが出来る。したがって、関連する技術においてはウェハ1の最表面に固定電荷が存在することで数10%の測定誤差が生じていたが、この固定電荷を少なくすることで、反射プローブ光28の強度や位相を正確に測定することが出来、ウェハ1の結晶状態を精度良く読み出すことが出来る。また、イオン注入工程(S20)の後、検査工程(S30)の前にウェハ1の最表面層を剥離する必要がなくなる。特に、半導体装置に使用されるpn接合の深さが比較的浅い場合には、半導体装置の特性を損なうことがなくなる。このように、固定電荷を少なくする処理(S100)を施すことで、固定電荷が反射プローブ光28の測定に及ぼす影響、ウェハ1の表面に誘起された光キャリアの再結合過程への影響を抑えることができる。例えば、固定電荷がウェハ1中のポンプ光25、プローブ光26或いは反射プローブ光28を吸収することが抑制される。また、イオン注入工程(S20)の前に固定電荷を少なくする処理(S100)を施すことにより、イオン注入工程(S20)の後に固定電荷を少なくする処理(S100)を行った場合に失ってしまうイオン注入の情報をも読み出すことが出来る。したがって、ウェハ1の極最表層の情報を失うことなく、また、固定電荷によって変化させられることなく、半導体特性を高精度に評価することが可能になる。

## 【0055】

図2に示した半導体評価装置は、注入イオンのドーズ量やプロファイルだけではなく、ウェハ1中の微小欠陥に対しても同等な感度を有する。ウェハ1中の微小欠陥の分布は室温でも変化することが知られている。したがって、注入イオンのドーズ量のウェハ1面内での均一性が1%で管理されていても、微小欠陥のウェハ1面内でのばらつきが大きい場合、シグナルの強度が数%に大きくなってしまう。

## 【0056】

上述したイオン注入工程(S20)において、イオン注入の条件に応じてイオン注入角度を適切に選択することによって、図1のホイール4を回転させながらウェハ1にイオン注入する際に、ウェハ1面内で均一な密度の微小欠陥が生成される。よって、ウェハ1面内でのシグナルのばらつきを低減することが出来る。即ち、ウェハ1中の微小欠陥等に起因するウェハ面内でのシグナルのバラツキを低減することが可能になり、高精度な半導体特性評価が可能となる。また、イオン注入におけるチャネリング等の影響の少ない注入角度を選択することにより、ウェハ1面内でのシグナルのバラツキを低減することが出来る。例えば、リン(P)イオンを、加速エネルギー500keVで注入する場合、ホイール4の回転軸5とイオンビーム2との角度が平行になる前後2.5度以内であれば、シグナルのウェハ1の面内均一性がドーズ量換算で1%以内に収まる。

## 【0057】

イオン注入の加速エネルギーが比較的大きい場合、注入イオンのチャネリング現象及び注入イオンと格子原子との相互作用の影響が大きく、シグナルの面内均一性は低い。一方、イオン注入の加速エネルギーが比較的小さい場合、シグナルの面内均一性は高い。本発明の実施の形態に係るイオン注入方法を用いることにより、イオン注入の加速エネルギーが比較的大きい場合であっても、シグナルの面内均一性を高めることが出来る。

## 【0058】

上述したシグナル測定(S30a)において、シグナルを測定する前にポンプ光25を3秒間以上照射することで、イオン注入によって発生した点欠陥の動き、すなわち、原子空孔や格子間原子が消滅、生成する反応を熱力学的な準定常状



態にすることが出来る。この熱平衡状態においてシグナルを測定することで、過剰キャリアが再結合するまでの時間（ライフタイム $\tau$ ）のばらつきが低減し、シグナルのばらつきが低減する。例えば、ポンプレーザ 1 1 のレーザパワーが 8 0 mW、ポンプ光 2 5 の変調周波数が 2 k H z である場合、シグナルの測定までの待ち時間を 0. 3 秒から 3 秒にすることで、シグナルの測定値の再現性を示す標準偏差を最大 1 / 5 にまで低減することが出来る。

## 【 0 0 5 9 】

上述したシグナル補正（S 3 0 b）によれば、シグナルを測定した時のイオン注入後からの経過時間に依らず、イオン注入直後の反射プローブ光 2 8 のシグナル強度を計算することが出来る。

## 【 0 0 6 0 】

（シグナル測定過程の第 1 の変形例）

図 1 3 及び図 1 4 （a）乃至（d）を参照して、図 9 のシグナル測定過程（S 3 0 a）の第 1 の変形例を示す。また、N 個のウェハを連続的に測定する場合について説明する。第 1 の変形例において、シグナル測定過程（S 3 0 a）は、S 3 3 0 ～ S 3 3 9 段階を具備する。

## 【 0 0 6 1 】

（a）先ず S 3 3 0 段階において、第 n のウェハとして  $n = 1$ （第 1 のウェハ）を選択する。n は、1 ～ N の自然数である。

## 【 0 0 6 2 】

（b）S 3 3 1 段階において、第 1 のウェハについて測定準備を行う。測定準備には、第 1 のウェハのチャンバ 1 8 内への搬入作業、ポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 の入射光学系及び反射ポンプ光 2 7 及び反射プローブ光 2 8 の反射光学系の調整作業が含まれる。

## 【 0 0 6 3 】

（c）S 3 3 1 段階に並行して、図 2 の反射プローブ光 2 8 と同じ光路上に、反射プローブ光 2 8 と同等な光を発生させる（S 3 3 2 段階）。具体的には、第 1 のウェハの表面と同等な反射率を有する反射体を、プローブ光 2 6 の光路上に配置して、反射体にプローブ光 2 6 を照射する。例えば、図 1 4 （a）に示すよ

うに、ステージ 1 0 上に反射体の一例としてダミーサンプル 3 2 を載置し、x-y 方向にステージ 1 0 を移動することで、ダミーサンプル 3 2 上に照射領域 3 0 を配置する。なお、ダミーサンプル 3 2 を配置するステージ 1 0 上の位置は、第 1 のウェハが載置されるウェハ位置 3 1 とは異なる。

## 【 0 0 6 4 】

(d) S 3 3 1 段階の後に、S 3 3 3 段階において、図 1 4 (b) に示すように、ステージ 1 0 上のウェハ位置 3 1 に第 1 のウェハ 1 を載置する。このとき、照射領域 3 0 は、ダミーサンプル 3 2 及び第 1 のウェハ 1 の何れからも外れてしまっても構わない。

## 【 0 0 6 5 】

(e) S 3 3 4 段階において、図 1 4 (c) に示すように、第 1 のウェハ 1 表面の所望の領域にポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 を照射する。

## 【 0 0 6 6 】

(f) S 3 3 5 段階において、第 1 のウェハ 1 表面にポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 を照射しながら、検出器 1 3 及びロックインアンプ 2 1 を用いて反射プローブ光 2 8 の強度を測定する。

## 【 0 0 6 7 】

(g) S 3 3 6 段階において、図 1 4 (d) に示すように、ステージ 1 0 上から第 1 のウェハ 1 を外す。その後、第 1 のウェハ 1 は、ロードポート 1 9 を介してチャンバ 1 8 の外へ搬出される (S 3 3 7)。

## 【 0 0 6 8 】

(h) S 3 3 8 段階において、n が N であるか否かを判断する。1 回目のサイクルでは、S 3 3 0 段階において  $n = 1$  を設定している為 (S 3 3 8 において No)、S 3 3 9 段階において、n に 1 加え、新たに  $n = 2$  を定義する (S 3 3 9)。S 3 3 1 及び S 3 3 2 段階に戻り、第 2 のウェハについて、上述した S 3 3 1 ~ S 3 3 7 段階を実施する。このように、第 1 乃至第 N のウェハについて S 3 3 1 ~ S 3 3 9 段階のループを繰り返し実施する。

## 【 0 0 6 9 】

上記の方法によれば、第 n のウェハ 1 にプローブ光 2 6 を照射していない非測

定時にも、反射光学系に測定時と同様な光を入射させておくことが出来る。したがって、反射光学系が熱膨張したり、検出器 1 3 の検出感度が受光時と非受光時に変化する場合でも、反射光学系がずれることなく、時間的に安定したシグナル測定が可能になり、測定値の再現性が向上する。例えば、1 時間以上前から非測定状態であった後に連続して複数のシグナル測定を実施した場合、最初の測定値とその後の測定値との間の測定誤差を解消することが出来る。半導体評価装置が直前まで測定状態だったか、非測定状態だったかによらず、安定したシグナル測定が可能になる。反射光学系には、第 n のウェハ 1 から検出器 1 3 までの間の反射プローブ光 2 8 の光路上に配置された対物レンズ 1 7、第 2 のハーフミラー 1 5 及びフィルタ 1 6 が含まれる。また、ダミーサンプル 3 2 は、測定対象となる第 n のウェハ 1 と同様な結晶構造を有し、同様な表面処理が施されている。

## 【 0 0 7 0 】

なお、ステージ 1 0 上にダミーサンプル 3 2 を載置することが容易でない場合、入射した光を鏡面反射する面を有するミラーを図 2 の半導体評価装置の光学系の途中に挿入しても構わない。或いは、ミラー及び光学波面再生素子を利用して、反射光学系に光を入射させても構わない。また、S 3 3 2 段階は、第 n のウェハ 1 についての反射プローブ光の測定 (S 3 3 5) の後 3 分以内に開始し、第 n + 1 のウェハへのプローブ光 2 6 の照射 (S 3 3 4) 前 3 分以内まで実施することが望ましい。更に、S 3 3 2 段階において、ダミーサンプル 3 2 にプローブ光 2 6 のみならずポンプ光 2 5 を照射しても構わない。測定準備段階 (S 3 3 1) において、反射光学系にシグナル測定時と同様な光を入射させておくことが出来る。また更に、第 1 の変形例に係るシグナル測定方法は、前述した第 1 の半導体評価方法のみならず、第 2 の半導体評価方法についても適用可能である。

## 【 0 0 7 1 】

(シグナル測定過程の第 2 の変形例)

図 1 5 及び図 1 6 を参照して、図 9 のシグナル測定過程 (S 3 0 a) の第 2 の変形例を示す。

## 【 0 0 7 2 】

この第 2 の変形例においては、図 1 5 に示すような、ポンプ光 2 5 を第 1 のウ

ェハ23へ照射するポンプレーザ11と、プローブ光26を第1のウェハ23へ照射するプローブレザ12と、反射プローブ光28を検出する検出器13と、第1のウェハ23とは異なる他の半導体ウェハ（第2のウェハ24）中に光キャリアを励起する光子エネルギーを有する予備ポンプ光29を第2のウェハ24へ照射する予備レーザ6と、第1及び第2のハーフミラー14、15と、フィルタ16と、対物レンズ17と、チャンバ18と、ロードポート19と、ポンプレーザ用電源20と、ロックインアンプ21と、計算機22とを有する半導体評価装置を用いる。

## 【0073】

第1及び第2のウェハ23、24は、同じステージ10上に載置されている。第1のウェハ23に対してシグナル測定を行っている間に、予備レーザ6を用いて第2のウェハ24に予備ポンプ光29を照射することが出来る。ステージ10を移動することにより、第1のウェハ23に対するシグナル測定が終了した直後に、第2のウェハ24に対してシグナル測定を実施することが出来る。即ち、第2のウェハ24に対してシグナルを測定する直前まで予備ポンプ光29を3秒間以上照射することができる。したがって、イオン注入によって発生した点欠陥の動き、すなわち、原子空孔や格子間原子が消滅、生成する反応を熱力学的な準定常状態にすることが出来る。この熱平衡状態においてシグナルを測定することで、過剰キャリアが再結合するまでの時間（ライフタイム $\tau$ ）のばらつきが低減し、シグナルのばらつきが低減する。第1のウェハ23に対するシグナル測定が終了した直後に、第2のウェハ24に対するシグナル測定を開始できる為、複数のウェハを連続して処理する場合に、ウェハの処理効率が向上する。

## 【0074】

次に、図16を参照して、図15に示した半導体評価装置を用いたシグナル測定（S30a）の方法について説明する。また、N個のウェハを連続的に測定する場合について説明する。第2の変形例において、図9のシグナル測定（S30a）は、S360～S371段階を有する。

## 【0075】

（A）先ずS360段階において、第nのウェハとして $n=1$ （第1のウェハ

) を選択する。n は、1 ～ N の自然数である。

【 0 0 7 6 】

(B) S 3 6 1 段階において、第 1 のウェハ 2 3 をロードポート 1 9 を介してチャンバ 1 8 内に搬入する。S 3 6 2 段階において、第 1 のウェハ 2 3 をステージ 1 0 上に載置する。

【 0 0 7 7 】

(C) S 3 6 3 段階において、第 1 のウェハ 2 3 表面の所望の領域にポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 を照射する。S 3 6 4 段階において、第 1 のウェハ 2 3 表面にポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 を照射しながら、検出器 1 3 及びロックインアンプ 2 1 を用いて反射プローブ光 2 8 の強度を測定する。

【 0 0 7 8 】

(D) S 3 6 3 及び S 3 6 4 段階と並行して、S 3 6 5 ～ S 3 6 7 段階を実施する。S 3 6 5 段階において、ロードポート 1 9 を介して第 2 のウェハ 2 4 をチャンバ 1 8 内に搬入する。S 3 6 6 段階において、第 2 のウェハ 2 4 をステージ 1 0 上に載置する。S 3 6 7 段階において、第 2 のウェハ 2 4 表面の所望の領域に予備ポンプ光 2 9 を照射する。

【 0 0 7 9 】

(E) S 3 6 4 段階が終了した後、S 3 7 0 段階において、n が N であるか否かを判断する。1 回目のサイクルでは、S 3 6 0 段階において  $n = 1$  を設定している為 (S 3 7 0 において No)、S 3 7 1 段階において、n に 1 加え、新たに  $n = 2$  を定義する。S 3 6 3 段階に戻り、第 2 のウェハ 2 4 について、上述した S 3 6 3 及び S 3 6 4 段階を実施する。また同時に S 3 6 5 段階に戻り、第 2 のウェハ 2 4 に並行して、第 3 のウェハについて、上述した S 3 6 5 ～ S 3 6 7 段階を実施する。このように、第 1 乃至第 N のウェハについて S 3 6 3 ～ S 3 6 7 段階のループを繰り返し実施する。

【 0 0 8 0 】

(F) なお、S 3 6 4 段階が終了した後、第 n のウェハは、ステージ 1 0 上から外される (S 3 6 8)。その後、第 n のウェハは、ロードポート 1 9 を介してチャンバ 1 8 の外へ搬出される (S 3 6 9)。

## 【0081】

以上説明したように、第  $n$  のウェハに対してシグナル測定を行っている間に、予備レーザ6を用いて第  $n+1$  のウェハに予備ポンプ光29を照射することにより、第  $n$  のウェハに対するシグナル測定が終了した直後に、第  $n+1$  のウェハに対してシグナル測定を実施することが出来る。したがって、複数のウェハを連続して処理する場合に、ウェハの処理効率が向上する。また、第  $n+1$  のウェハに対してシグナルを測定する直前まで予備ポンプ光29を3秒間以上照射することができる。したがって、シグナルを測定する時に、イオン注入によって発生した点欠陥の動き、すなわち、原子空孔や格子間原子が消滅、生成する反応を熱力学的な準定常状態にすることが出来る。

## 【0082】

(前処理工程の変形例)

図17を参照して、図9の前処理工程(S10)の変形例について説明する。前処理工程の変形例において、前処理工程(S10)は、S100及びS110段階を具備する。

## 【0083】

(a) S100段階において、ウェハ1の最表面に介在する固定電荷を少なくする処理を実施する。固定電荷には、ケミカルオキサイドが含まれる。固定電荷を少なくする処理(S100)は、例えば、ウェハ1の表面に対する希フッ酸溶液によるウェット処理、またはウェハ1内の結晶欠陥を水素(H)原子でターミネートする処理である。具体的には、ウェハ1の表面を希フッ酸溶液にさらすことで、ウェハ1の最表層に介在する固定電荷が多い膜を除去する。また、ウェハ1内の結晶欠陥を水素原子でターミネートするには、水素雰囲気中でウェハ1を高温に放置すればよい。ウェハ1の表面を含むイオンが注入されるべき領域に存在する結晶欠陥を、水素原子でターミネートすることが出来る。このように、S100段階は、図10に示したそれと同一である。

## 【0084】

(b) S110段階において、ウェハ1に対してその表面を覆う処理を施す。具体的には、ウェハ1の表面に絶縁膜を形成する。絶縁膜には、熱処理によりウ

ェハ 1 表面を含む上部に形成される熱酸化膜、及び化学的気相成長 (CVD) 法などを用いてウェハ 1 表面に堆積される酸化膜、窒化膜或いは酸窒化膜が含まれる。

#### 【 0 0 8 5 】

以上説明したように、第 3 の変形例に係るイオン注入用前処理方法によれば、図 1 0 に示した前処理工程 (S 1 0) を実施した場合と同様な作用効果を奏する。また、S 1 1 0 段階を実施することにより、絶縁膜によりウェハ 1 表面を保護することが出来、ウェハ 1 の表面を固定電荷の少ない状態に長時間保持することが可能である。

#### 【 0 0 8 6 】

(シグナル補正過程の変形例)

図 1 8 乃至図 2 0 を参照して、図 9 のシグナル補正過程 (S 3 0 b) の変形例を示す。

#### 【 0 0 8 7 】

この変形例においては、図 1 8 に示すように、図 2 のロックインアンプ 2 1 から供給されるシグナルの強度を補正する機能を備えた演算部 6 0 と、演算部 6 0 に接続された第 1 の関数形データベース 6 1、検出信号記憶部 6 2 及びプログラム記憶部 6 3 と、入出力制御部 6 4 と、入力装置 6 5 と、出力装置 6 6 とを有する計算機 2 2 を用いる。演算部 6 0 は、第 2 の関数形フィッティング部 6 7 と、QC 値計算部 6 8 とを有する。

#### 【 0 0 8 8 】

第 2 の関数形フィッティング部 6 7 は、検出信号記憶部 6 2 に記憶されている、反射プローブ光 2 8 の強度及びプローブ光 2 6 の照射開始から反射プローブ光 2 8 の強度を測定するまでの経過時間から、第 2 の関数形  $f_2$  を求める。第 2 の関数形  $f_2$  は、プローブ光 2 6 を照射し始めてからの経過時間に対する反射プローブ光 2 8 の強度の変化を示す。第 2 の関数形  $f_2$  については図 1 9 を参照して後述する。

#### 【 0 0 8 9 】

QC 値計算部 6 8 は、プローブ光 2 6 を照射し始めた直後の反射プローブ光 2

8の強度、イオン注入後から反射プローブ光28の強度を測定するまでの経過時間、及び第1の関数形 $f_1$ を用いて、イオン注入直後の反射プローブ光28の強度を求める。

## 【0090】

第2の関数形フィッティング部67により求められた第2の関数形 $f_2$ は、一般的に図19に示すようなプロファイルを有する。横軸はイオン注入後からの経過時間を示し、縦軸はシグナルの強度を示す。第2の関数形 $f_2$ は、シグナル $S_{ga_1}$ を含む丸印で示した複数の点を繋げたプロファイルを有する。丸印で示した複数の点は、プローブ光26を照射し始めた時刻 $t_0$ から複数の時刻 $t_{0.5}$ 、 $t_1$ 、・・・において測定したシグナルの実測値である。このように、シグナルの強度は、第1の関数形 $f_1$ に示すようにイオン注入後からの経過時間によって減少するだけでなく、更に、第2の関数形 $f_2$ に示すようにプローブ光26の照射により第1の関数形 $f_1$ よりも急激に減少する。

## 【0091】

シグナル $S_{ga_1}$ は、時刻 $t_0$ から時刻 $t_1$ までの一定期間、プローブ光26を照射した後に測定したものである。すなわち、第1の関数形 $f_1$ は、一定期間のプローブ光26照射後のシグナル強度とイオン注入後の経過時間との関係を示している。したがって、図19に示すように、プローブ光26を照射した直後のシグナル強度とイオン注入後の経過時間との関係を示す、新たな第1の関数形 $f_1'$ が存在する。新たな第1の関数形 $f_1'$ と第1の関数形 $f_1$ とは、イオン注入直後のシグナル強度が異なる。したがって、イオン注入直後であり、且つプローブ光26照射開始直後におけるシグナル $S_{gb_0}$ の強度を求める必要がある。なぜなら、第2の関数形 $f_2$ が示すように、シグナル強度は、プローブ光26の照射時間に応じて第1の関数形 $f_1$ よりも急激に減少するからである。なお、第1の関数形 $f_1$ 及び新たな第1の関数形 $f_1'$ は、第1の関数形データベース61に記憶されている。

## 【0092】

第2の関数形 $f_2$ は、プローブ光26照射開始後からの経過時間の対数を含む複数の項を足し合わせて、(6)式のように表わすことができる。(6)式にお



いて、 $A_0$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_k$ 、 $\tau v_1$ 、 $\tau v_2$ 、 $\tau v_k$ は、それぞれ補正係数を示し、 $t_0$ は、プローブ光 2 6 を照射し始めた時刻を示す。図 2 に示す半導体評価装置を用いて、プローブ光 2 6 照射開始後から複数の経過時間においてシグナルを測定することで、各補正係数が求められる。イオン注入条件或いはプローブ光 2 6 の照射時間などによって、第 2 の関数形  $f_2$  の各補正係数は変化する。なお、第 2 の関数形  $f_2$  は、通常、(6) 式右辺の第 1 項乃至第 3 項だけを用いて十分に表わすことができ、第 4 項は必要に応じて追加される。

【0093】

$$f_2 = A_0 + D_1 \exp \{-(t-t_0)/\tau v_1\} + D_2 \exp \{-(t-t_0)/\tau v_2\} + \sum D_k \exp \{-(t-t_0)/\tau v_k\} \quad \dots (6)$$

図 2 0 に示すように、図 1 8 の計算機を用いて行うシグナル補正過程（図 9 の S 3 0 b）は、S 3 9 0 ～ S 3 9 3 段階を備える。

【0094】

(a) S 3 9 0 段階において、予め、図 1 9 に示した新たな第 1 の関数形  $f_1$  を求める。具体的には、イオン注入後から複数の経過時間において図 2 に示す半導体評価装置を用いてシグナルを測定する。複数のシグナルの測定値に対して (5) 式に示す第 1 の関数形  $f_1$  をフィッティングすることで、(5) 式の各補正係数を求める。求められた第 1 の関数形  $f_1$  の各補正係数は、第 1 の関数形データベース 6 1 に記憶される。そして、第 1 の関数形データベース 6 1 に記憶されている第 1 の関数形  $f_1$  の中からシグナルの測定値に対して最適なものを選択する。

【0095】

(b) S 3 9 1 段階において、第 2 の関数形フィッティング部 6 7 は、反射プローブ光 2 8 の強度及びプローブ光 2 6 の照射開始から反射プローブ光 2 8 の強度を測定するまでの経過時間から、第 2 の関数形  $f_2$  を求める。具体的には、プローブ光 2 6 を照射し始めた時刻  $t_0$  から複数の時刻  $t_{0.5}$ 、 $t_1$ 、 $\dots$  においてシグナルを測定する。複数のシグナルの測定値に対して (6) 式に示した第 2 の関数形  $f_2$  をフィッティングして、(6) 式の各補正係数を求める。例えば、図 1 9 においてシグナル  $S_{ga1}$  を含む複数の丸印の測定点に対して、第 2 の関数

形  $f_2$  をフィッティングする。

【0096】

(c) S392 段階において、QC 値計算部 68 は、第 2 の関数形  $f_2$  から、プローブ光 26 の照射開始直後の反射プローブ光 28 の強度を求める。例えば、図 19 において、第 2 の関数形  $f_2$  を用いて、時刻  $t_0$  におけるシグナル  $S_{gb_1}$  の強度を計算する。

【0097】

(d) S393 段階において、QC 値計算部 68 は、プローブ光 26 の照射開始直後の反射プローブ光 28 の強度、イオン注入後から反射プローブ光 28 の強度を測定するまでの経過時間、及び新たな第 1 の関数形  $f_1'$  を用いて、イオン注入直後の反射プローブ光 28 の強度を求める。例えば、図 19 において、時刻  $t_0$  におけるシグナル  $S_{gb_1}$  の強度及び新たな第 1 の関数形  $f_1'$  を用いて、イオン注入直後であり、且つプローブ光 26 照射開始直後におけるシグナル  $S_{gb_0}$  の強度を求める。

【0098】

上述したように、シグナル強度の経時変化には、イオン注入終了後からの経過時間に依存する成分と、シグナル測定を行っている時間、即ちプローブ光 26 を照射している時間に依存する成分とがある。上述したシグナル補正 (S30b) によれば、イオン注入後からシグナルを測定するまでの経過時間に依らず、イオン注入直後の反射プローブ光 28 のシグナル強度を計算することが出来る。また、プローブ光を一定時間照射した後にシグナルを測定した場合でも、イオン注入直後であり、且つプローブ光 26 照射開始直後におけるシグナル  $S_{gb_0}$  の強度を求めることが出来る。したがって、例えば、図 11 の S303 段階でポンプ光 25 を 3 秒以上照射した後にシグナルを測定した場合でも、図 12 に示したシグナル補正 (S380、S381) に比して高い精度でシグナルの初期値を計算することが出来る。したがって、プローブ光 26 を照射し始めた時刻での半導体の様々な特性を、迅速、且つ正確に求めることが出来る。また、例えばプローブレザ 12 の特性劣化などによるシグナル強度の変化を補正することができ、信頼性の高い測定値を得ることができる。

## 【 0 0 9 9 】

特に、シグナル測定値が、ウェハ 1 内の原子空孔の密度の変化、原子空孔のクラスタリング密度によって経時変化している場合に、精度良く半導体の特性を評価することが出来る。

## 【 0 1 0 0 】

(イオン注入工程の第 1 の実施例)

図 1 に示したイオンビーム 2 の加速エネルギーの高低に応じた、図 9 に示したイオン注入工程 (S 2 0) の実施例を以下に示す。まず、イオン注入工程の第 1 の実施例においては、イオンビーム 2 の加速エネルギーが比較的高い場合について説明する。

## 【 0 1 0 1 】

図 1 に示したイオン注入装置は、イオンビーム 2 のビーム軸及びホイール 4 の回転軸 5 の 2 つの軸によってウェハ 1 の表面に対するイオン注入の角度を決め、また、ホイール 4 を回転させることで、ホイール 4 上に配置された複数のウェハ 1 に均一にイオンを注入するバッチ式イオン注入機である。

## 【 0 1 0 2 】

図 1 に示したイオン注入装置を用いて、リン (P) イオンを 5 0 0 k e V の加速エネルギーにてイオン注入する (S 2 0) 。イオン注入処理後のウェハ 1 に対して、図 2 に示した半導体評価装置を用いて反射プローブ光 2 8 を測定する (S 3 0 a) 。この場合、イオンビーム 2 がホイール 4 の回転軸 5 に対して実質的に平行であれば、シグナル測定過程 (S 3 0 a) においてシグナル強度のウェハ 1 面内でのバラツキが軽減される。このため、ウェハ 1 面内での測定バラツキが軽減される。ウェハ 1 面内バラツキが抑えられることで、ウェハ 1 の測定位置によるバラツキがなくなり、測定再現性が向上する。

## 【 0 1 0 3 】

図 2 1 に示すように、イオンビーム 2 のホイール 4 の回転軸 5 に対する角度が、+ 2 度、平行 (0 度) 及び - 2 度である場合、シグナル強度のウェハ 1 面内での標準偏差 (ドーズ換算) が小さくなり、面内バラツキが抑えられる。しかし、イオンビーム 2 のホイール 4 の回転軸 5 に対する角度が - 5 度である場合、標準

偏差が大きくなり、面内バラツキを抑えることができない。このように、イオンビーム 2 とホイール 4 の回転軸 5 とが平行である場合、或いはイオンビーム 2 とホイール 4 の回転軸 5 とがなす角度が 2. 5 度以下である場合において、シグナル強度のウェハ 1 面内でのバラツキが軽減される。なお、イオン注入時に 8 nm 程度の酸化膜がウェハ 1 の表面に形成されている。

## 【 0 1 0 4 】

なお、高加速でイオン注入する時の加速エネルギーはイオン種により異なる。ここでは、リン (P) イオンについて説明したが、これに限定されるものではなく、その他のイオン種についても適用可能である。また、イオン注入時に 1 0 nm 程度の酸化膜がウェハ 1 の表面に形成されているか否かに係らず、イオンビーム 2 と回転軸 5 が実質的に平行であれば、優れた面内均一性が得られる。

## 【 0 1 0 5 】

また、イオン注入工程 (S 2 0) において、イオンビーム 2 とウェハ 1 のなす角度を、その角度の偏差が一番少なくなるように選択しても構わない。このことにより、上記と同様にして、反射プローブ光 2 8 の強度のウェハ 1 面内でのバラツキを抑え、再現性の良い測定が可能になる。

## 【 0 1 0 6 】

(イオン注入工程の第 2 の実施例)

次に、イオン注入工程の第 2 の実施例においては、イオンビーム 2 の加速エネルギーが比較的低い場合について説明する。

## 【 0 1 0 7 】

図 1 に示したイオン注入装置を用いて、ホウ素 (B) イオンを 3 keV の加速エネルギーにてイオン注入する (S 2 0)。なお、イオン注入前に、ウェハ 1 の表面に形成されている自然酸化膜を希フッ酸で剥離しておく。イオン注入処理後のウェハ 1 に対して、図 2 に示した半導体評価装置を用いて反射プローブ光 2 8 を測定する (S 3 0 a)。この場合、イオンビーム 2 がホイール 4 の回転軸 5 に対して実質的に平行であれば、シグナル測定過程 (S 3 0 a) においてシグナル強度のウェハ 1 面内でのバラツキが軽減される。

## 【 0 1 0 8 】

イオンの加速エネルギーが低い場合、イオンビーム 2 中のイオンの方向性がばらつく。したがって、ホイール 4 上のウェハ 1 を機械的に走査するときに、ウェハ 1 面内でホイール 4 の内周に近い側と外周に近い側で、照射されるイオンビーム 2 の形状がばらつく。また、イオン注入の加速エネルギーが低加速になると、イオンのチャネリングの臨界角が広がる。よって、イオンビーム 2 とホイール 4 の回転軸 5 が平行である時のイオンビーム 2 とウェハ 1 表面の成す角度がチャネリングの臨界角度に近くなる。そのため、ウェハ 1 表面とイオンビーム 2 との成す角度のウェハ 1 面内での偏差が一番小さいところで、チャネリングの違いが顕著になり最小値をとらない。そこで、ウェハ 1 表面とイオンビームとの成す角度の偏差の増加が少ない方向に沿って、チルト角が 2 度大きくなる方向にずらす。このように、イオンビーム 2 とホイール 4 の回転軸 5 が平行（0 度）であることが望ましいが、平行から若干ずれた角度でより高い面内均一性で測定が可能になる。面内均一性が上がることで、再現性の良い測定が可能になる。

## 【 0 1 0 9 】

図 2 2 に示すように、イオンビーム 2 とホイール 4 の回転軸 5 との角度が平行である場合或いは - 2 度である場合に比して、イオンビーム 2 とホイール 4 の回転軸 5 との角度が + 2 度である場合の方が、シグナル強度のウェハ 1 面内での標準偏差（ドーズ換算）が小さくなり、面内バラツキが抑えられる。

## 【 0 1 1 0 】

なお、図 1 に示したイオン注入装置を用いて低加速の加速エネルギーにてイオン注入する場合、イオンビーム 2 とウェハ 1 表面のなす角度の偏差が小さくなるイオン注入角度を選ぶことが望ましい。しかし、チャネリングの臨界角度近傍にこの偏差が来る場合は、チルト角を数度大きくすることで、シグナル強度のウェハ 1 面内バラツキを抑え、再現性の良い測定が可能になる。

## 【 0 1 1 1 】

（イオン注入工程の第 3 の実施例）

次に、イオン注入工程の第 3 の実施例においては、イオンビーム 2 の加速エネルギーが中程度である場合について説明する。

## 【 0 1 1 2 】

図 1 に示したイオン注入装置を用いて、ホウ素 (B) イオンを 30 keV の加速エネルギーにてイオン注入する (S20)。なお、イオン注入前に、ウェハ 1 の表面に形成されている自然酸化膜を希フッ酸で剥離しておく。イオン注入処理後のウェハ 1 に対して、図 2 に示した半導体評価装置を用いて反射プローブ光 28 を測定する (S30a)。この場合、イオンビーム 2 がホイール 4 の回転軸 5 に対して実質的に平行であれば、シグナル強度のウェハ 1 面内でのバラツキが軽減される。しかし同時に、イオン注入時にイオンビーム 2 がウェハ 1 の表面にあたる位置が少しずれることによって、ウェハ 1 面内でのシグナル強度の不均一性が起こる。したがって、イオンビーム 2 がホイール 4 の回転軸 5 に対して実質的に平行であってもシグナル強度のウェハ 1 面内でのバラツキが軽減されない。

#### 【0113】

そこで、加速エネルギーが中加速の場合、ホイール 4 の回転軸 5 とイオンビーム 2 を平行にしても起こってくる、円周方向の角度のバラツキを低減する、例えば、チルト角が 5 度、ツイスト角が 15 度となるイオン注入角度を選択する。このことにより、ウェハ 1 面内の均一性を向上することが可能になり、シグナル強度の面内バラツキを抑え、再現性の良い測定が可能になる。

#### 【0114】

ホイール 4 の回転軸 5 とウェハ 1 とのなす角度が 5 度の場合、チルト角及びツイスト角は、図 23 に示すような条件を満たすことが望ましい。即ち、円周方向の角度のバラツキを低減するイオン注入条件は、チルト角が 5 度であり、ツイスト角が 255 乃至 270 度である。なお、チルト角が 5 度、ツイスト角が 180 度において、イオンビーム 2 とホイール 4 の回転軸 5 とが平行になる。

#### 【0115】

次に、膜厚 8 nm の自然酸化膜が形成されているウェハ 1 に対してホウ素 (B) イオンを 30 keV の加速エネルギーにてイオン注入する場合について説明する。この場合、イオンビーム 2 とウェハ 1 表面とのなす角度のバラツキは、酸化膜があることでウェハ 1 の特性に大きな影響を及ぼさない。しかし、イオンビーム 2 がウェハ 1 表面にあたる位置が少しずれることによって起こってくるウェハ 1 面内での不均一性は起こる。

## 【 0 1 1 6 】

そこで、イオンビーム 2 のバラツキが少なくなるように、イオンビーム 2 のベクトルと空間分布を考慮して、イオン注入角度を選択することで、ウェハ 1 面内の均一性を向上することが可能になる。例えば、図 2 4 に示すように、イオンビーム 2 とウェハ 1 表面とのなす角度を + 4 度に設定する。このことにより、ウェハ 1 面内の均一性を向上することが可能になり、シグナル強度の面内バラツキを抑え、再現性の良い測定が可能になる。

## 【 0 1 1 7 】

(アモルファス化の判断方法の第 1 の実施例)

従来、イオン注入後のウェハの最表面がアモルファス化したか否かは、ラザフォード後方散乱 (Rutherford Backscattering Spectrometry: R B S) 等の測定を行うか、透過型電子顕微鏡 (T E M) を用いてウェハを観察することで、判断してきた。現在、R B S 及び T E M を用いてインラインにて特性評価 (Q C) を行うことは難しく、アモルファス化の観察技術に習熟したオペレータが、自己の経験及び知識に基づいて判断していた。また、T E M 観察用のサンプルを作成するには、長い時間がかかってしまう。したがって、アモルファス層の形成状況を測定するには数日の期間を要していた。

## 【 0 1 1 8 】

図 1 に示したイオン注入装置を用いて、ウェハ 1 表面に砒素 (A s) イオンを 3 0 k e V の加速エネルギーにてイオン注入する (S 2 0)。イオン注入処理後のウェハ 1 に対して、図 2 に示した半導体評価装置を用いて、プローブ光 2 6 及び 2 k H z で変調したポンプ光 2 5 をそれぞれ照射し、反射プローブ光 2 8 を測定する (S 3 0 a)。ここでは特に、図 2 5 に示すように、反射プローブ光 2 8 のうち、ポンプ光 2 5 の変調周波数の 2 倍の周波数の成分 (以下、「2 倍周波数成分  $\theta 2$ 」と呼ぶ) を選択的に取り出す。

## 【 0 1 1 9 】

2 倍周波数成分  $\theta 2$  と基準変調 F s との位相ずれ D f をモニターし、位相ずれ D f に基づいてウェハ 1 最表面がアモルファス化しているか否かを客観的に判断する。実際には、アモルファス化と 2 倍周波数成分  $\theta 2$  の検量線を予め作成する

。この検量線を用いて、ドーズに対するアモルファス化の度合いを測ることが可能になる。

#### 【 0 1 2 0 】

例えば、図 2 6 ( a ) に示すように、注入イオンのドーズ量が比較的少ない場合、位相ずれ  $Df$  は小さく、アモルファス層は形成されていない。これに対して、注入イオンのドーズ量が比較的多い場合、位相ずれ  $Df$  は大きく、アモルファス層が形成されている。したがって、位相ずれ  $Df$  が小さい第 1 の領域 7 1 と位相ずれ  $Df$  が大きい第 2 の領域 7 2 との間に検量線を作成することで、アモルファス層の形成の有無を判断することが可能となる。なお、図 2 6 ( b ) に示すように、反射プローブ光 2 8 のうち、ホンプ光 2 5 の変調周波数と同期している成分の位相ずれは、注入イオンのドーズ量に係らず生じない。

#### 【 0 1 2 1 】

以上説明したように、注入イオンのドーズ量をインラインに配置された図 2 に示す Q C 装置を用いて測定することにより、イオン注入 ( S 2 0 ) 時にウェハ 1 最表面にアモルファス層が形成されているか否かを判断することができる。このことによって、製品開発の現場で、アモルファス層が形成される時の注入イオンのドーズ量を迅速に知ることが出来、早期の製品開発に寄与する。また、イオン注入装置のドーズ量や電流量の揺らぎによって、アモルファス層の形成が不十分になるなどの不良が起こった際にも、アモルファス化しているかどうかを迅速に測定することができ、製品不良の管理を迅速化することに役立つ。

#### 【 0 1 2 2 】

なお、図 2 7 に示すように、ウェハ 1 面内を、高濃度にイオンを注入した領域 7 3 a、・・・と低濃度にイオンを注入した領域 7 4 a、・・・とに段階的に区分けする。このウェハ 1 面内の各領域 7 3 a、・・・、7 4 a、・・・について 2 倍周波数成分  $\theta 2$  を測定する。2 倍周波数成分  $\theta 2$  の値とアモルファスになる時のシグナル強度の相関をあらかじめ取っておくことで、2 倍周波数成分  $\theta 2$  の値からアモルファス化するドーズ量を検出することができる。このように、一枚のウェハ 1 を用いて、アモルファス化するドーズ量を検出することが可能になる。なお、ウェハ 1 面内のドーズ量の分布は、一義的である必要はない。段階的



に区分けする場合に限らず、連続的にドーズをウェハ 1 面内で変化させても構わない。

#### 【 0 1 2 3 】

(アモルファス化の判断方法の第 2 の実施例)

注入イオンのドーズ量を変えながら、図 1 に示したバッチ式イオン注入装置を用いて  $\text{BF}_2$  イオン、As イオン及び Ge イオンを注入する。そして、図 2 に示した半導体評価装置を用いてシグナル強度のウェハ 1 面内分布を測定する。ウェハ 1 面内分布のトレンドがかわるところで、アモルファス化が起こることを検出することができる。このことにより、アモルファス化の有無を、反射プローブ光 28 の強度の面内分布の変化の様子から判断することが出来、事前に検量線等を作成する必要がなくなる。

#### 【 0 1 2 4 】

シグナル強度のウェハ 1 の面内分布には、2 次元の分布及び 1 次元の分布が含まれる。例えば、図 28 に示すように、ウェハ 1 中心を通る幾つかの方向 75 a ~ 75 d に沿ってシグナル強度を測定、つまり、ラインスキャンする。ウェハ 1 中心を通る幾つかの方向 75 a ~ 75 d に沿った、シグナル強度分布の傾向を観察する。シグナル強度分布の傾向をイオン注入のドーズ量を変えて観察し、シグナル強度分布の傾向が変化したところを境にして、ウェハ 1 内でアモルファス化が生じていることが検出できる。したがって、事前に検量線を引く必要がなくなる。

#### 【 0 1 2 5 】

なお、アモルファス化する時のドーズ量は、イオン注入時のウェハ 1 の温度に依存する。したがって、アモルファス化の判断方法の第 1 及び第 2 の実施例において、アモルファス化する時のドーズ量をウェハ 1 の温度ごとに予め測定しておくことで、イオン注入時のウェハ 1 の温度を間接的に測ることが可能になる。イオン注入機の冷却機構などに不具合が生じた場合の特性評価 (QC) 等に活用できる。

#### 【 0 1 2 6 】

また、アモルファス化する時のドーズ量は、イオン注入時のイオンビーム 2 の

電流量に依存する。したがって、アモルファス化の判断方法の第 1 及び第 2 の実施例において、アモルファス化する時のドーズ量をイオンビーム 2 の電流量ごとに予め測定しておくことで、イオン注入時のイオンビーム 2 のビーム電流の違いを検出することが可能になる。

## 【 0 1 2 7 】

(その他の実施の形態)

上記のように、本発明は、実施の形態及びその一部の変形例及び実施例によって記載したが、この開示の一部をなす論述及び図面はこの発明を限定するものであると理解すべきではない。この開示から当業者には様々な代替実施の形態、実施例及び運用技術が明らかとなろう。

## 【 0 1 2 8 】

図 1 に示したイオン注入装置を用いたイオン注入方法において、ホイール 4 の回転軸 5 を基底状態からホイール 4 の回転面に対して水平方向には動かさずにイオン注入を実施する。ホイール 4 の機械的なぶれを低減することが出来、微小欠陥のウェハ面内均一性が向上する。シグナル強度のウェハ 1 面内均一性が向上する。

## 【 0 1 2 9 】

図 2 又は図 1 5 に示す半導体評価装置は、半導体デバイスの製造ライン上に配置することで、イオン注入工程を含む被検査工程のインラインモニターとして使用することが出来る。

## 【 0 1 3 0 】

また、図 9 において、イオン注入工程 (S 2 0) の後、検査工程 (S 3 0) の前に、アニール工程を実施しても構わない。この場合、図 2 又は図 1 5 に示す半導体評価装置は、アニール処理後の p n 接合深さを評価することが出来る。

## 【 0 1 3 1 】

図 9 に示すイオン注入工程 (S 2 0) は、検査工程 (S 3 0) に対する被検査工程の一例である。本発明の実施の形態における被検査工程は、イオン注入工程 (S 2 0) に限定されず、半導体膜或いは金属膜の成膜工程であっても構わない。この場合、図 2 又は図 1 5 に示す半導体評価装置は、半導体膜或いは金属膜の

膜厚を評価することが出来る。

【 0 1 3 2 】

このように、本発明はここでは記載していない様々な実施の形態等を包含するということを理解すべきである。したがって、本発明はこの開示から妥当な特許請求の範囲に係る発明特定事項によってのみ限定されるものである。

【 0 1 3 3 】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、高い測定精度及び測定再現性を成し得る半導体評価装置及び半導体評価方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明の実施の形態に係るイオン注入装置を示す断面図である。

【図 2】

本発明の実施の形態に係る半導体評価装置を示す断面図である。

【図 3】

図 2 に示したステージ 1 0 とポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 の照射領域 3 0 との関係を示す斜視図である。

【図 4】

図 2 に示した半導体評価装置における、ポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 のウェハ 1 への照射部分を拡大した断面図である。

【図 5】

ポンプ光 2 5 及び反射プローブ光 2 8 の強度変調の様子を示すグラフである。

【図 6】

p 型単結晶シリコンから成る半導体電流路 5 0 における過剰キャリアの挙動を説明する為の模式図である。

【図 7】

図 2 に示した計算機 2 2 を示すブロック図である。

【図 8】

図 7 の第 1 の関数形データベース 6 1 に記憶されている第 1 の関数形 f 1 の一

例を示すグラフである。

【図 9】

本発明の実施の形態に係る半導体ウェハの処理手順の全体の流れを示すフローチャートである。

【図 1 0】

図 9 に示した前処理工程（S 1 0）の構成を示すフローチャートである。

【図 1 1】

図 9 に示したシグナル測定過程（S 3 0 a）の構成を示すフローチャートである。

【図 1 2】

図 9 に示したシグナル補正過程（S 3 0 b）の構成を示すフローチャートである。

【図 1 3】

本発明の実施の形態のシグナル測定過程（S 3 0 a）の第 1 の変形例を示すフローチャートである。

【図 1 4】

図 1 4（a）乃至図 1 4（d）は、図 1 3 に示したシグナル測定過程におけるステージ 1 0 とポンプ光 2 5 及びプローブ光 2 6 の照射領域 3 0 との関係を示す斜視図である。

【図 1 5】

本発明の実施の形態のシグナル測定過程（S 3 0 a）の第 2 の変形例に用いる半導体評価装置を示す断面図である。

【図 1 6】

図 1 5 に示した半導体評価装置を用いた半導体評価方法を示すフローチャートである。

【図 1 7】

本発明の実施の形態の前処理工程（S 1 0）の変形例を示すフローチャートである。

【図 1 8】

本発明の実施の形態のシグナル補正過程の変形例に用いる計算機 2 2 を示すブロック図である。

【図 1 9】

図 1 8 に示した第 1 の関数形データベース 6 1 に記憶されている第 1 の関数形  $f_1$  及び新たな第 1 の関数形  $f_1'$  の一例及び第 2 の関数形フィッティング部 6 7 によって求められた第 2 の関数形  $f_2$  の一例を示すグラフである。

【図 2 0】

図 1 8 に示した計算機 2 2 を用いて行うシグナル補正過程 (S 3 0 b) を示すフローチャートである。

【図 2 1】

イオン注入工程の第 1 の実施例におけるイオンビーム 2 のホイール 4 の回転軸 5 に対する角度条件とシグナルの面内均一性との関係を示す表である。

【図 2 2】

イオン注入工程の第 2 の実施例におけるイオンビーム 2 のホイール 4 の回転軸 5 に対する角度条件とシグナルの面内均一性との関係を示す表である。

【図 2 3】

イオン注入工程の第 3 の実施例におけるチルト角及びツイスト角とシグナルの面内均一性との関係を示す表である。

【図 2 4】

イオン注入工程の第 3 の実施例におけるイオンビーム 2 のホイール 4 の回転軸 5 に対する角度条件とシグナルの面内均一性との関係を示す表である。

【図 2 5】

アモルファス化の判断方法の第 1 の実施例におけるポンプ光 2 5、ポンプ光 2 5 の変調周波数の 2 倍の周波数の成分  $\theta_2$  及び基準変調  $F_s$  の相互関係を示すグラフである。

【図 2 6】

図 2 6 (a) は、図 2 5 の位相ずれ  $D_f$  と注入イオンのドーズ量との関係を示すグラフである。図 2 6 (b) は、反射プローブ光 2 8 のうちポンプ光 2 5 の変調周波数と同期している成分の位相ずれと注入イオンのドーズ量との関係を示す

グラフである。

【図 2 7】

ウェハ 1 面内を、高濃度にイオンを注入した領域 7 3 a、・・・と低濃度にイオンを注入した領域 7 4 a、・・・とに段階的に区分けする様子を説明する為の平面図である。

【図 2 8】

アモルファス化の判断方法の第 2 の実施例における、ウェハ 1 中心を通る幾つかの方向 7 5 a ～ 7 5 d に沿ってシグナル強度を測定する方法を説明する為の平面図である。

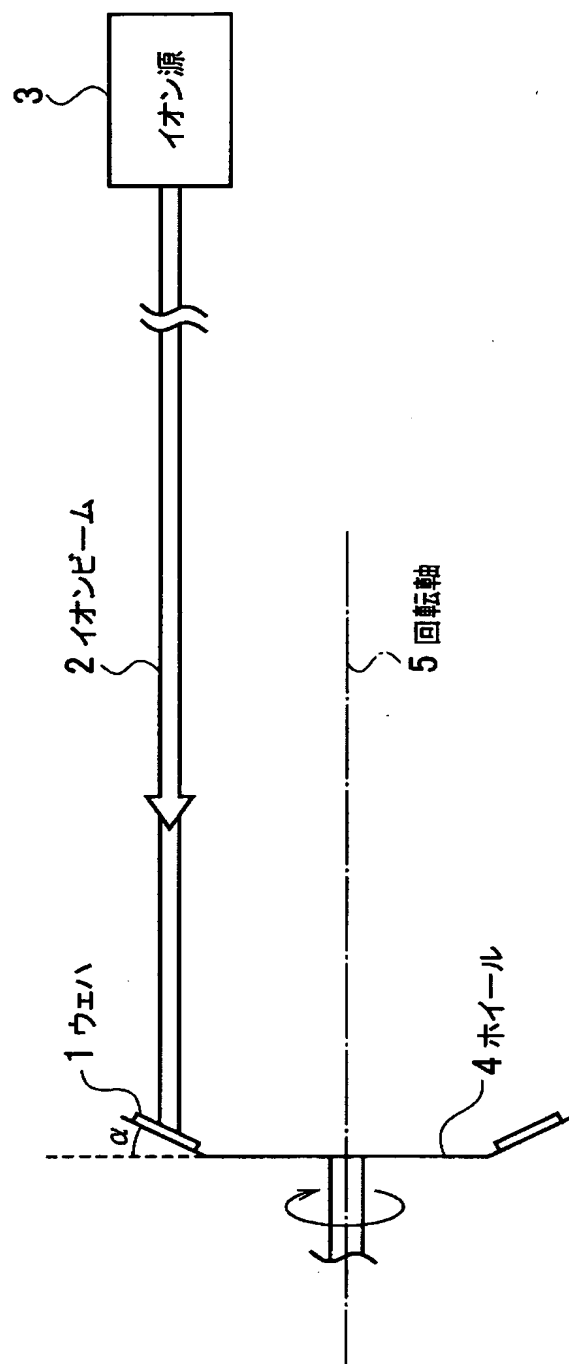
【符号の説明】

- 1      ウェハ
- 2      イオンビーム
- 3      イオン源
- 4      ホイール
- 5      回転軸
- 6      予備レーザ
- 1 0     ステージ
- 1 1     ポンプレーザ
- 1 2     プローブレザ
- 1 3     検出器
- 1 4     第 1 のハーフミラー
- 1 5     第 2 のハーフミラー
- 1 6     フィルタ
- 1 7     対物レンズ
- 1 8     チャンバ
- 1 9     ロードポート
- 2 0     ポンプレーザ用電源
- 2 1     ロックインアンプ
- 2 2     計算機 ( P C )

2 3	第 1 のウェハ
2 4	第 2 のウェハ
2 5	ポンプ光
2 6	プローブ光
2 7	反射ポンプ光
2 8	反射プローブ光
2 9	予備反射ポンプ光
3 0	照射領域
3 1	ウェハ位置
3 2	ダミーサンプル
4 0	イオン注入領域
4 3	非注入領域
5 0	半導体電流路
6 0	演算部
6 1	第 1 の関数形データベース
6 2	検出信号記憶部
6 3	プログラム記憶部
6 4	入出力制御部
6 5	入力装置
6 6	出力装置
6 7	第 2 の関数形フィッティング部
6 8	Q C 値計算部
θ 2	2 倍周波数成分
F s	基準変調
D f	位相ずれ

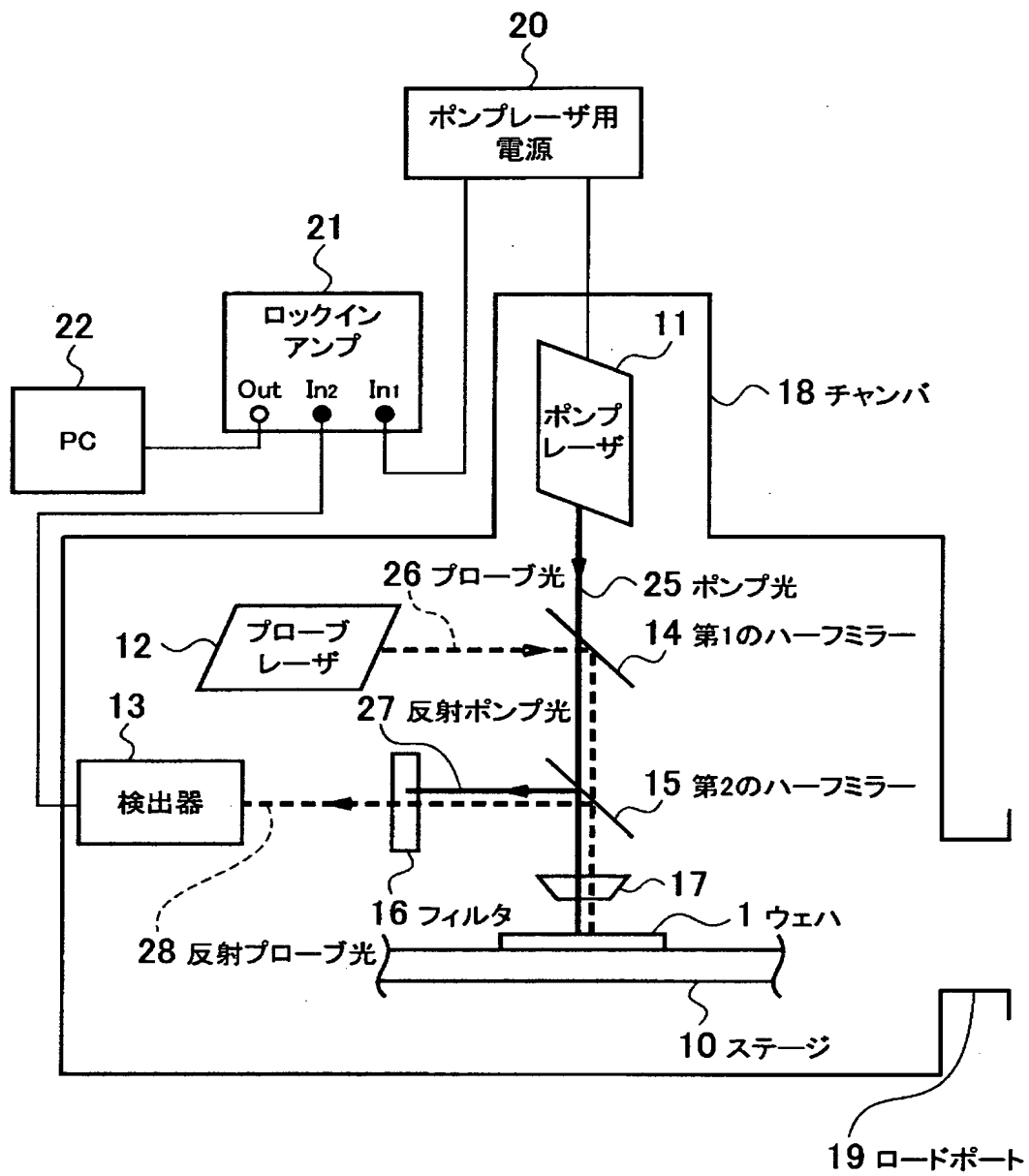
【書類名】 図面

【図 1】

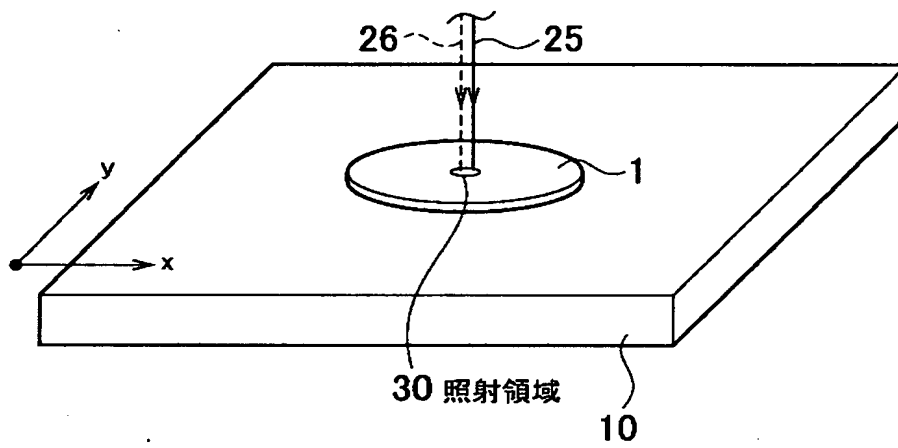




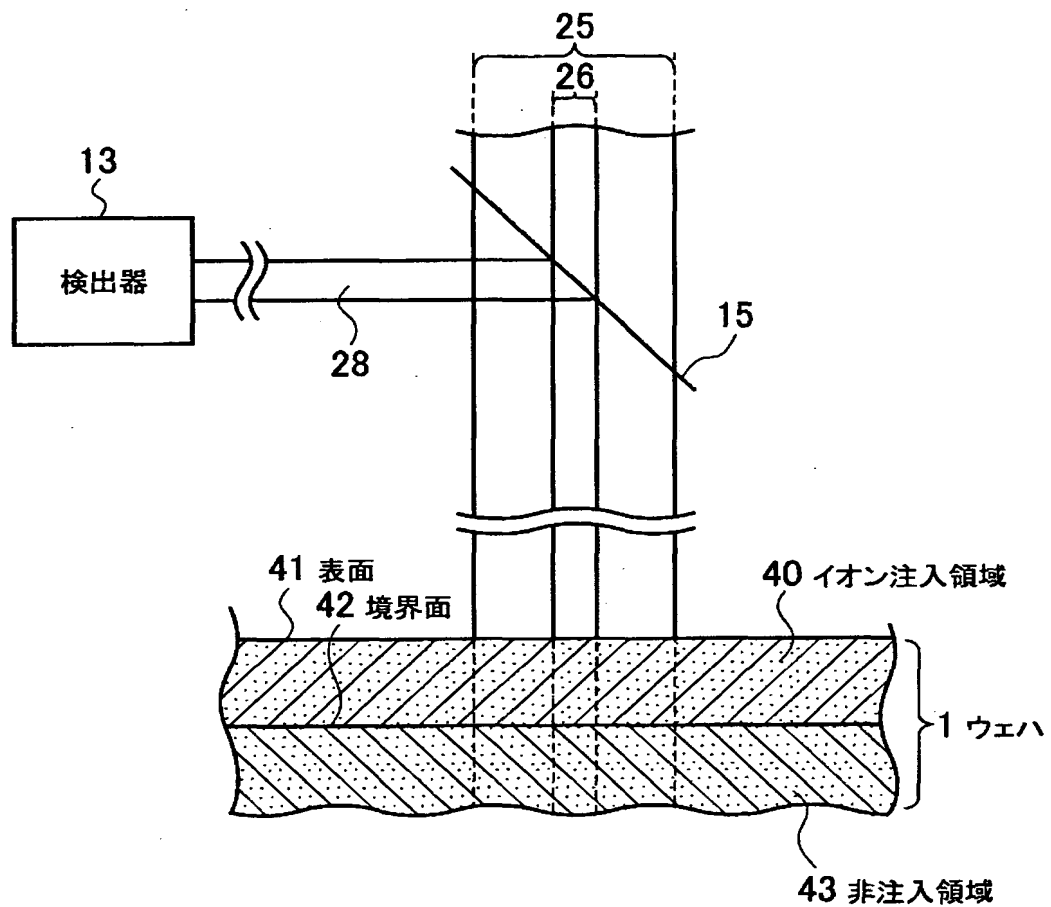
【図 2】



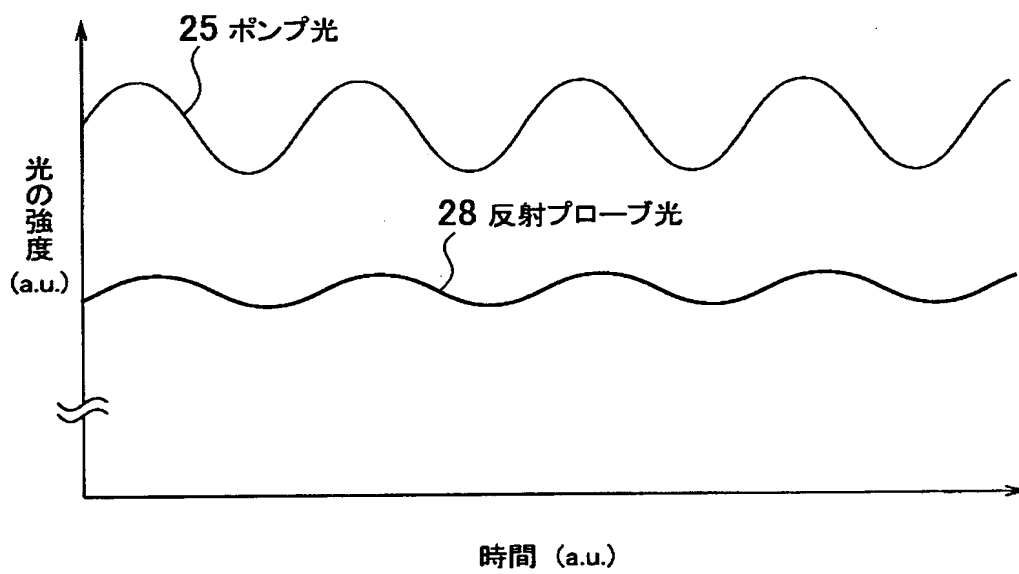
【図 3】



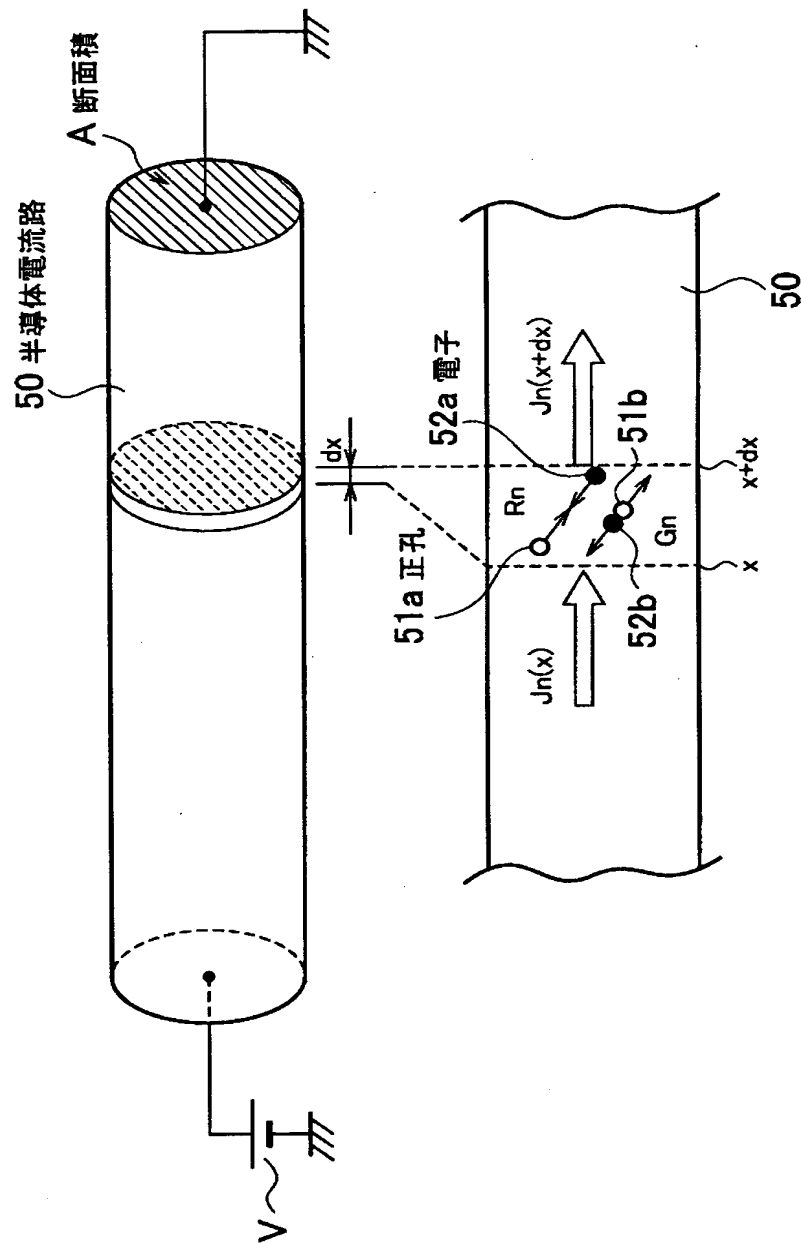
【図4】



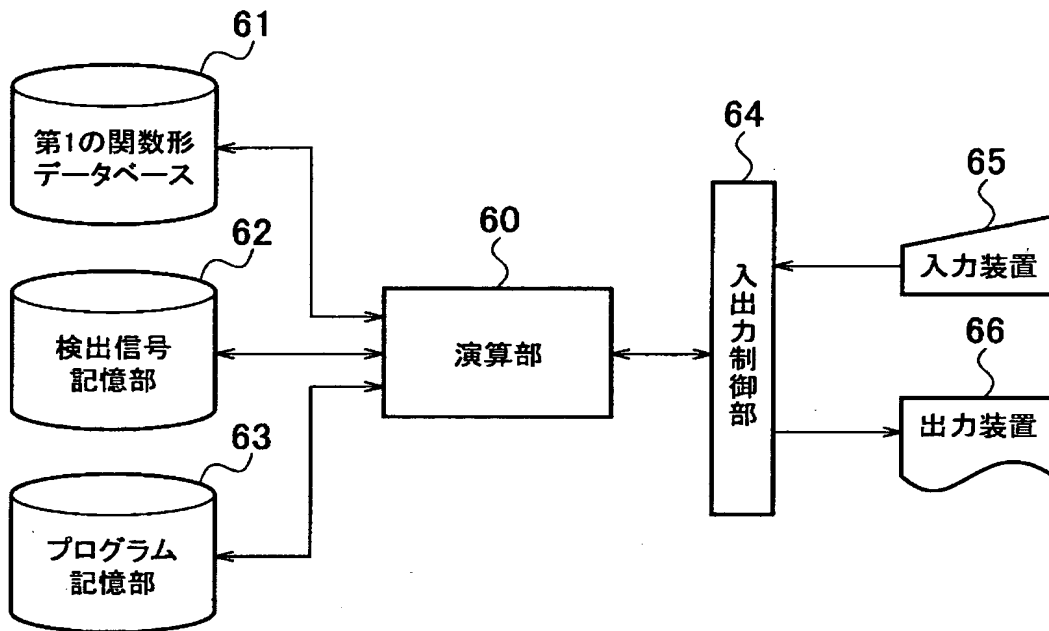
【図 5】



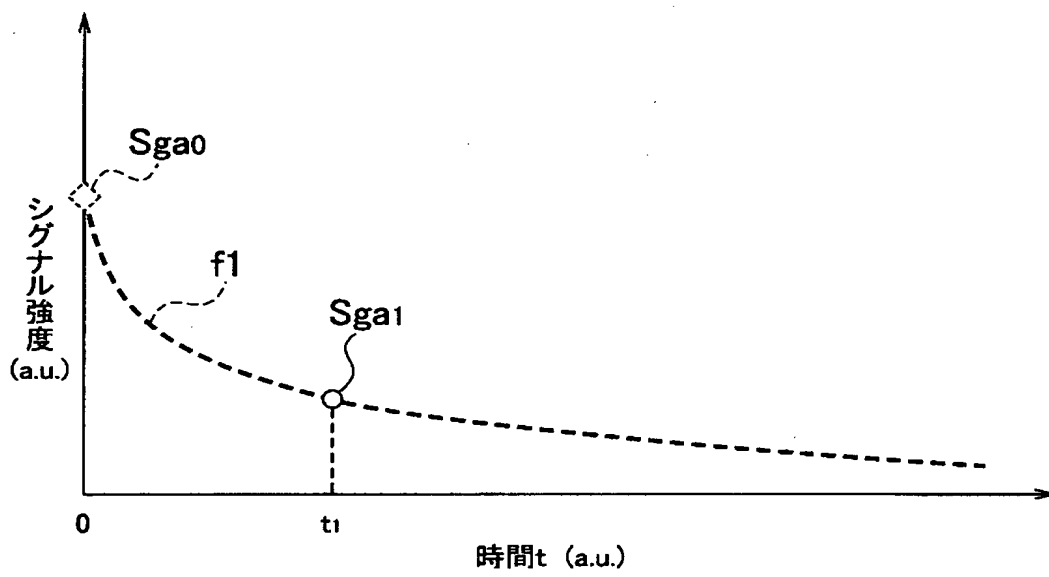
【図 6】



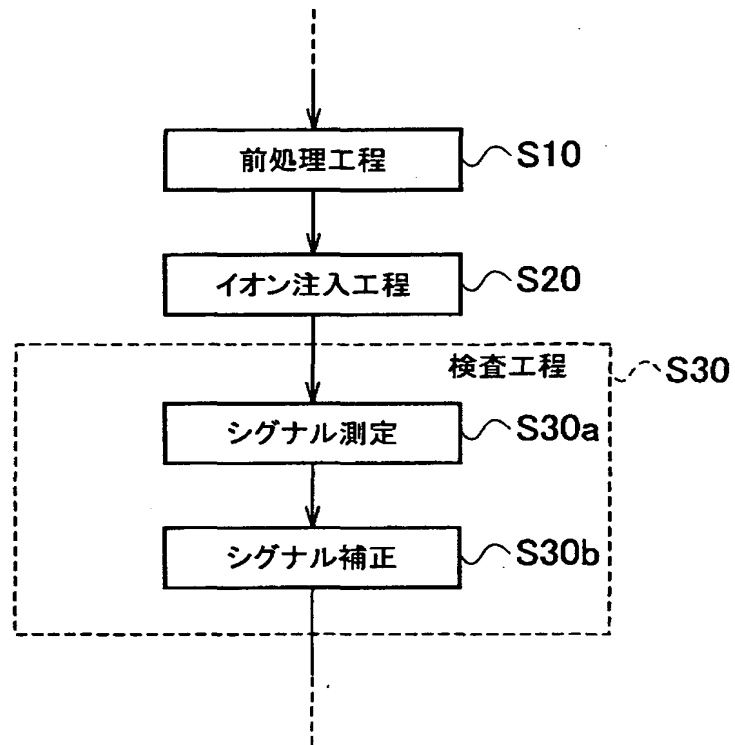
【図 7】



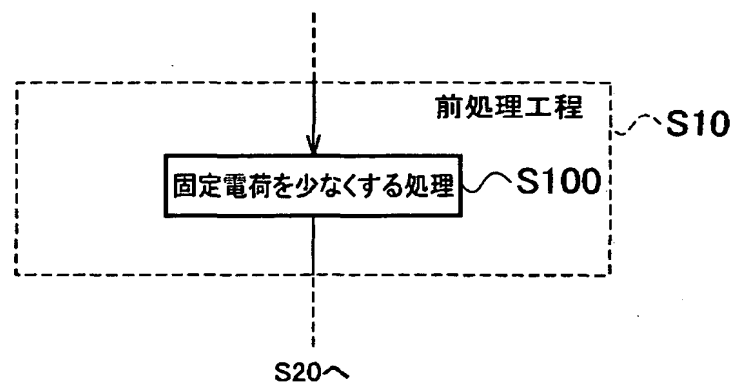
【図 8】



【図 9】

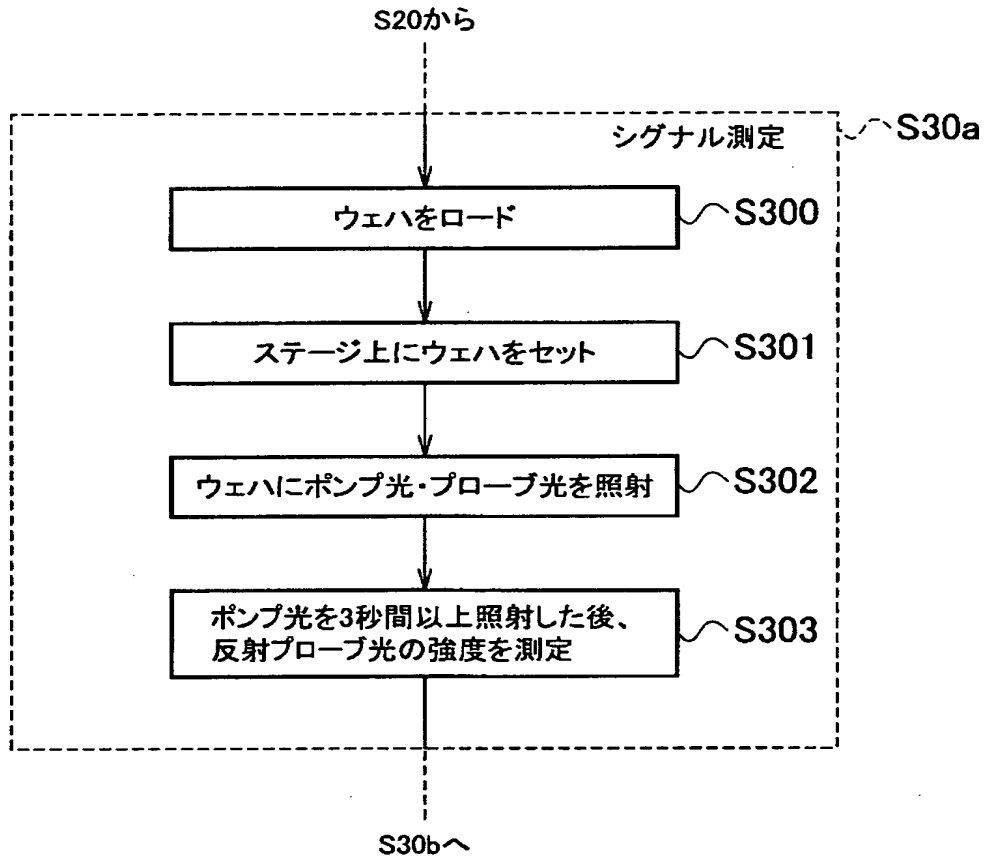


【図 1 0】

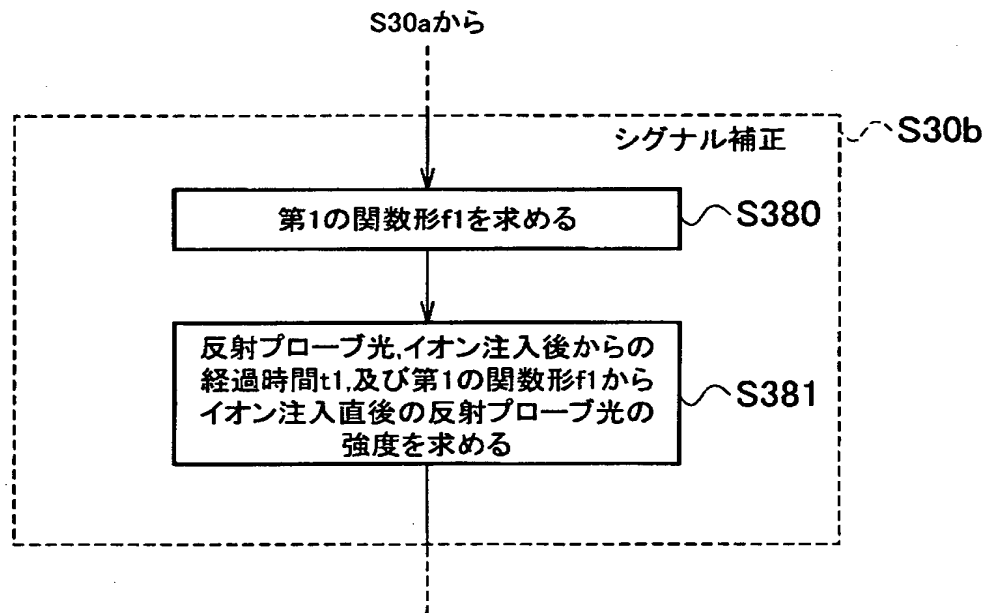




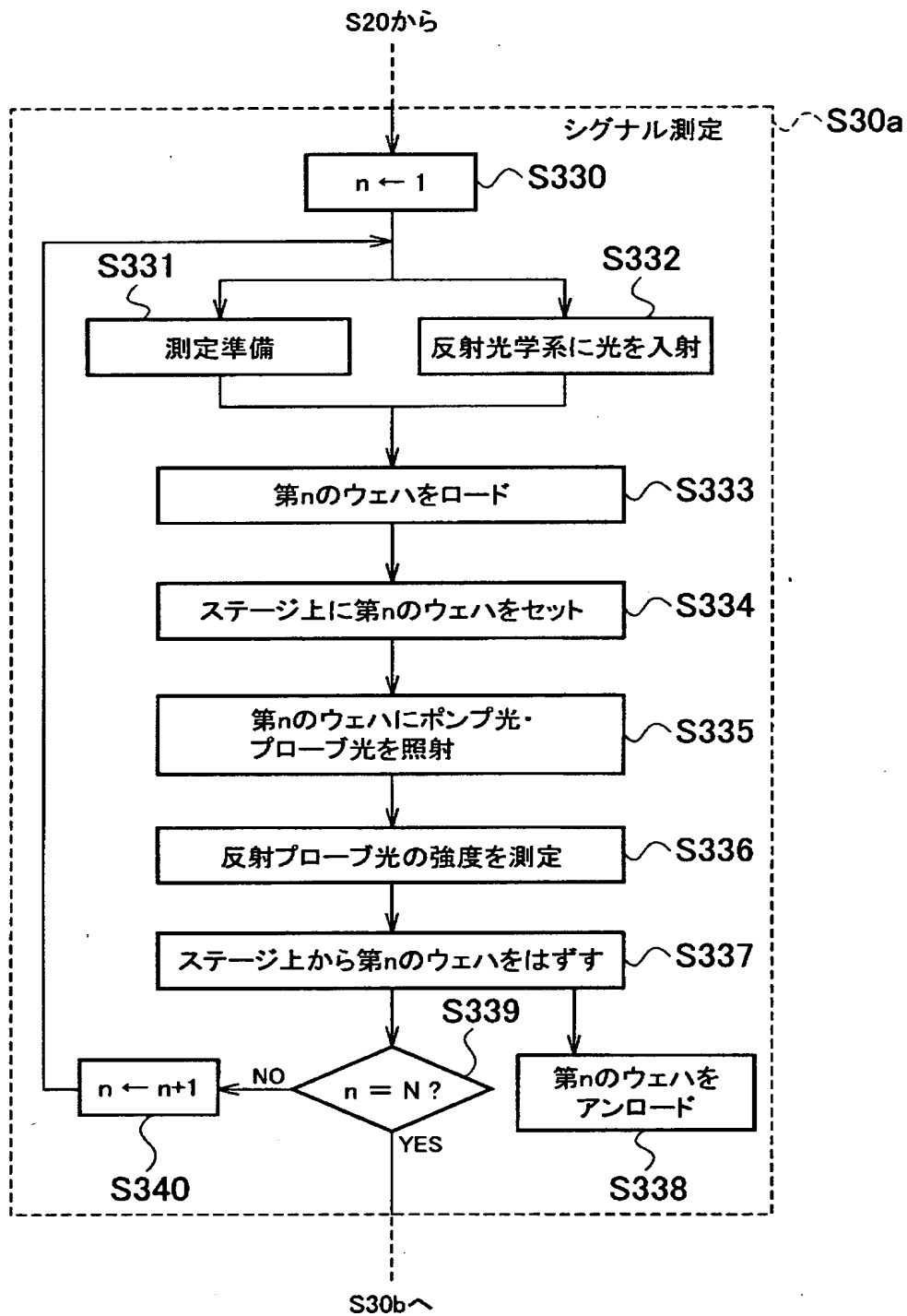
【図 1 1】.



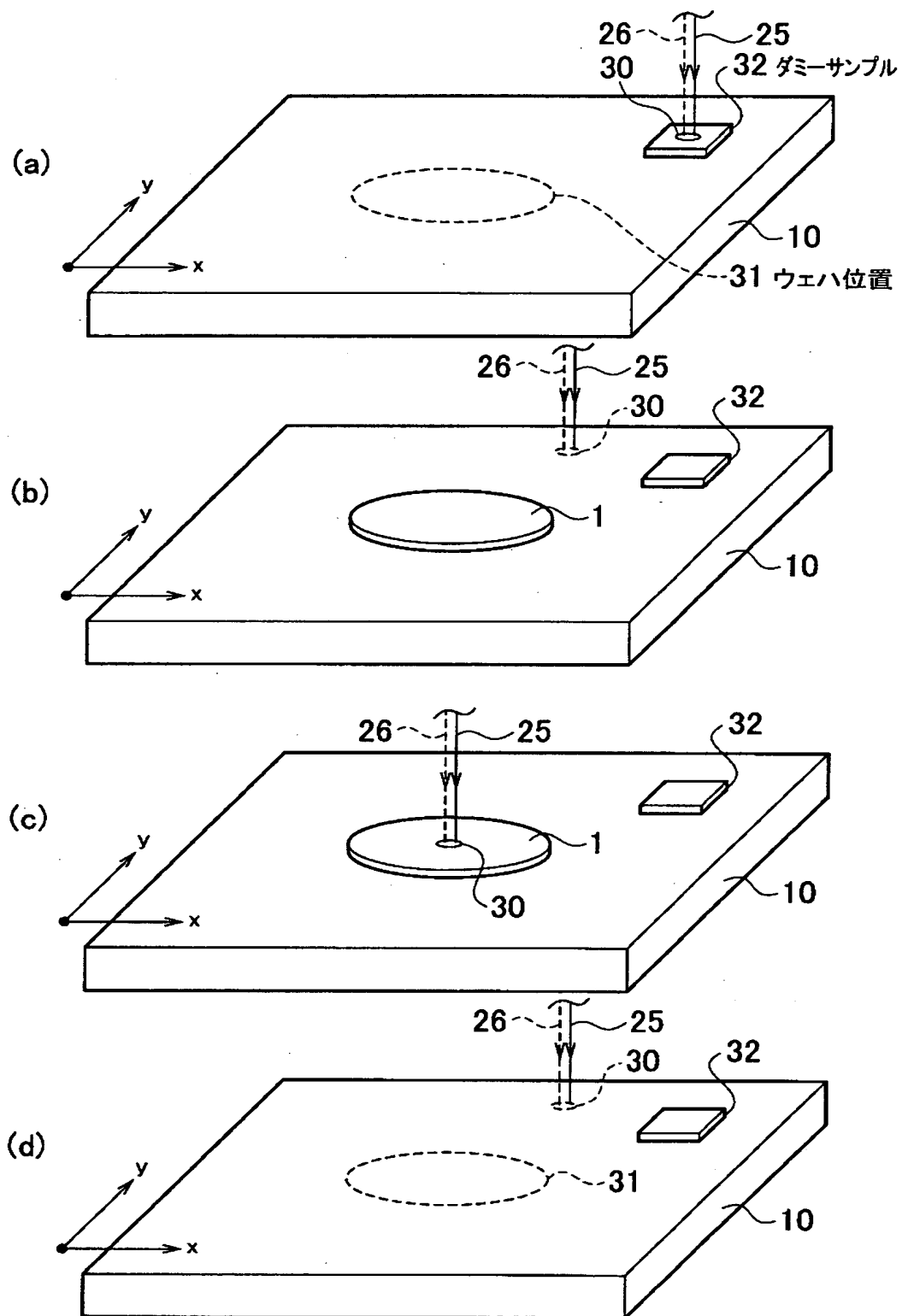
【図 1 2】



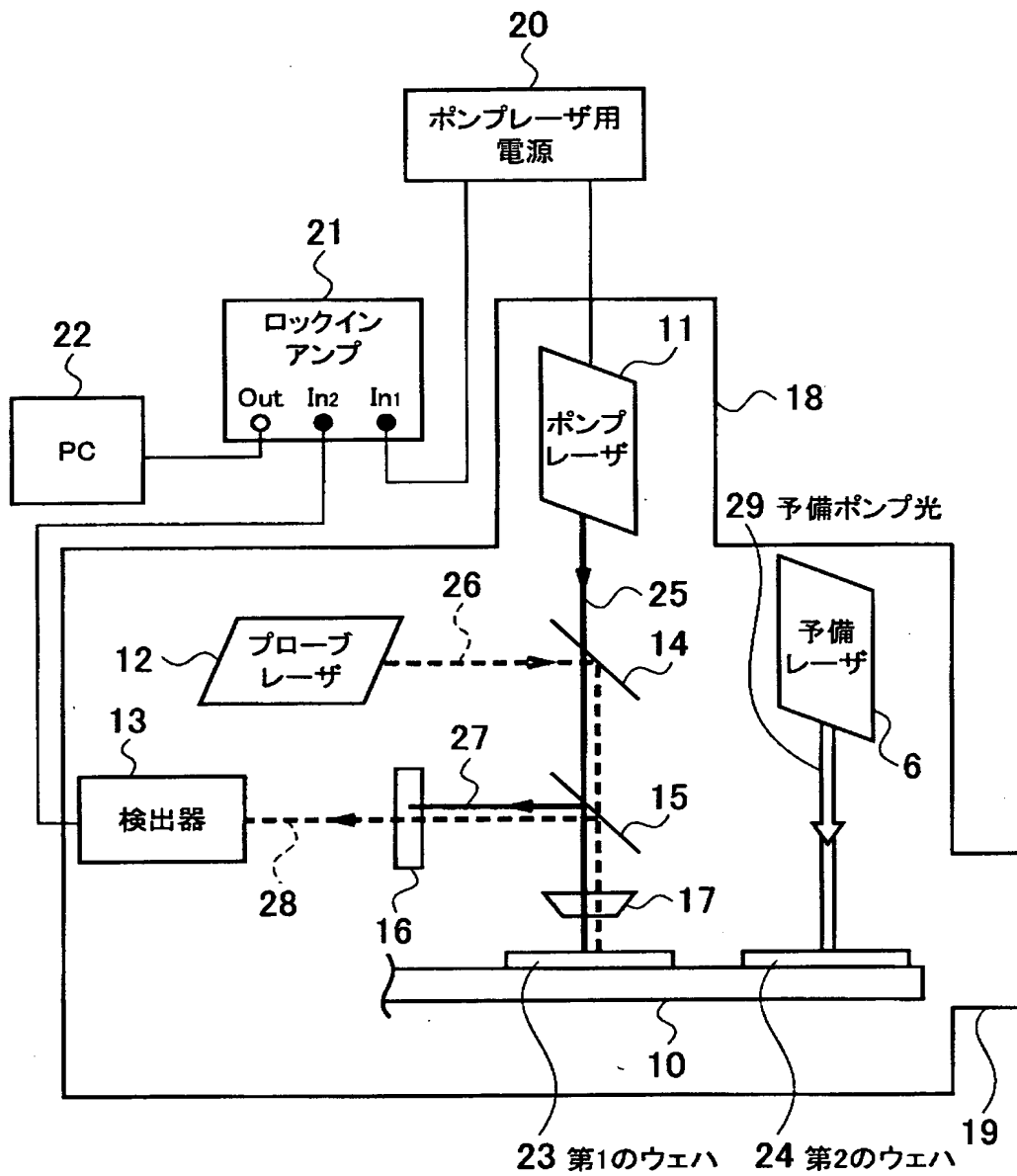
【図 13】



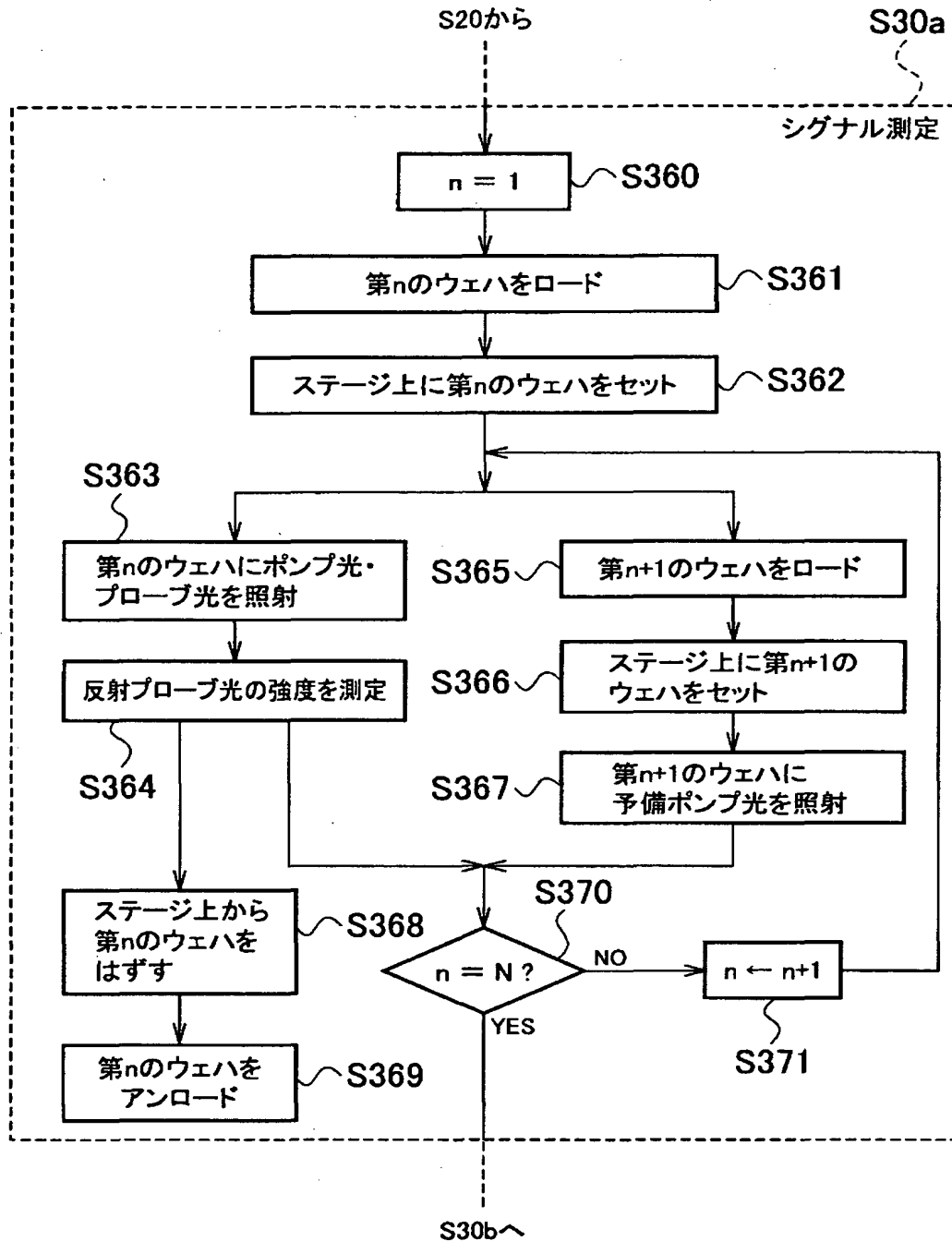
【図 14】



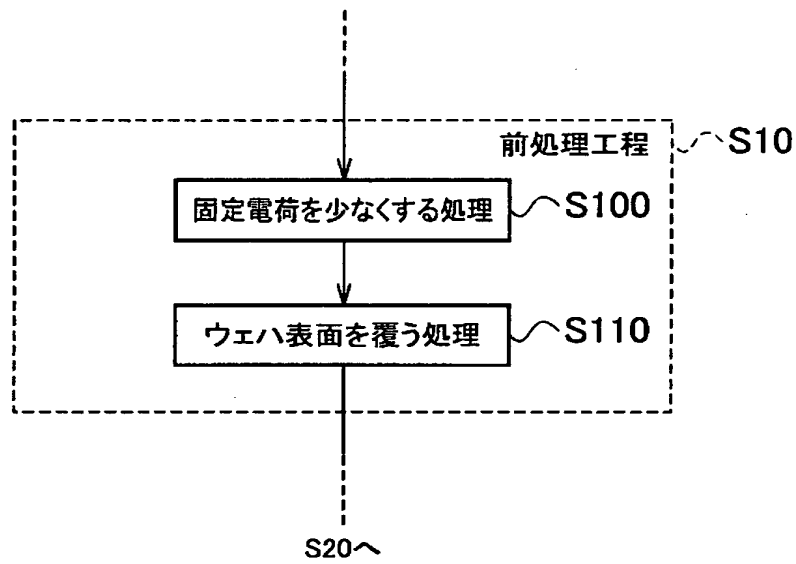
【図15】



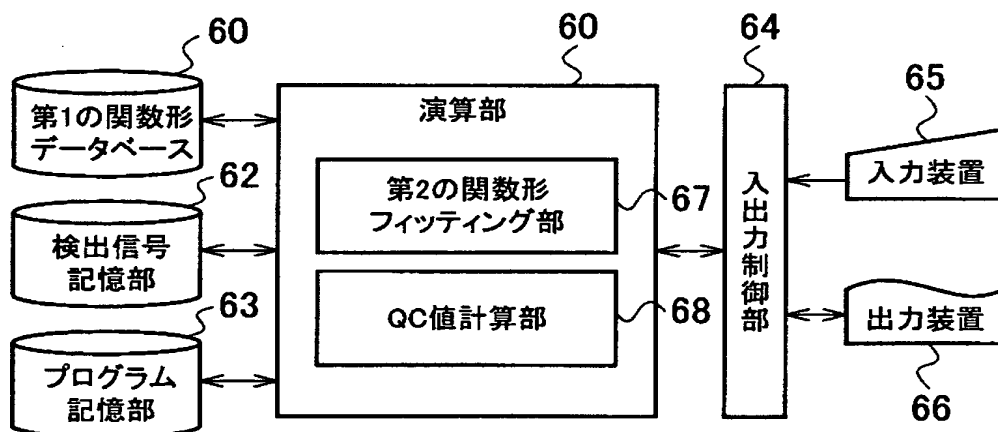
【図 16】



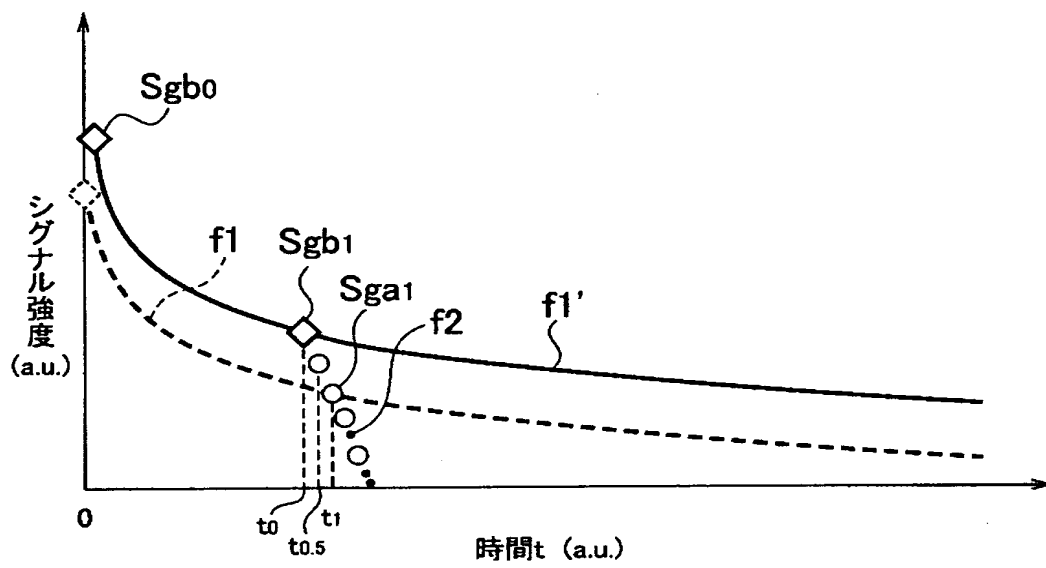
【図 1 7】



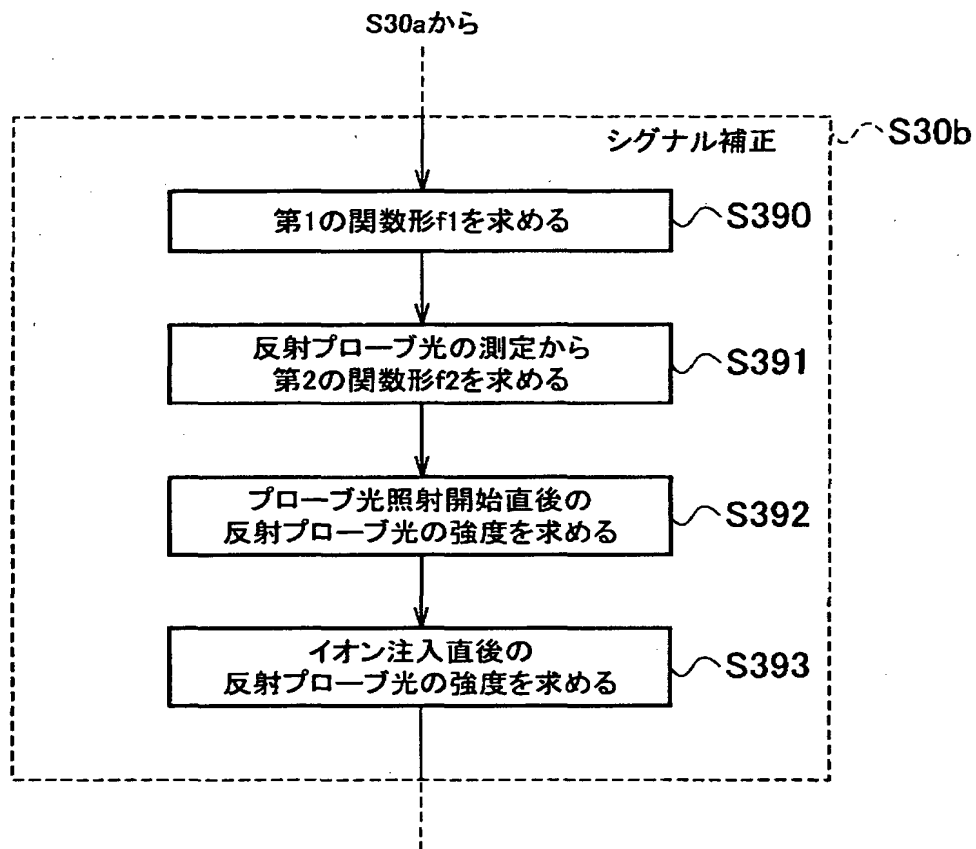
【図 1 8】



【図19】



【図20】





【図 2 1】

						シグナル面内均一性 ドーズ%換算
酸化膜 厚さ	イオン種	加速 エネルギー	ドーズ量	角度条件	イオン 注入装置	標準偏差 (ドーズ)%
8nm	P	500keV	5E+13	+2°	装置C	0.65
8nm	P	500keV	5E+13	平行	装置C	0.38
8nm	P	500keV	5E+13	-2°	装置C	0.51
8nm	P	500keV	5E+13	-5°	装置C	2.42

【図 2 2】

					シグナル面内均一性 ドーズ%換算
イオン種	加速 エネルギー	ドーズ量	角度条件	イオン 注入装置	標準偏差 (ドーズ)%
B	3keV	3E+15	+2°	装置A	0.483694052
B	3keV	3E+15	平行	装置A	0.602034279
B	3keV	3E+15	-2°	装置A	0.633528518

【図 2 3】

チルト角	ツイスト角	面内均一性 ドーズ(%)
0	0	1.01
0	0	1.35
7	0	1.24
5	180	1.36
7	180	1.77
9	180	2.71
7	203	1.40
5	210	0.874
5	225	1.16
5	240	0.913
7	247	2.75
5	255	0.54
5	270	0.60
7	270	1.43

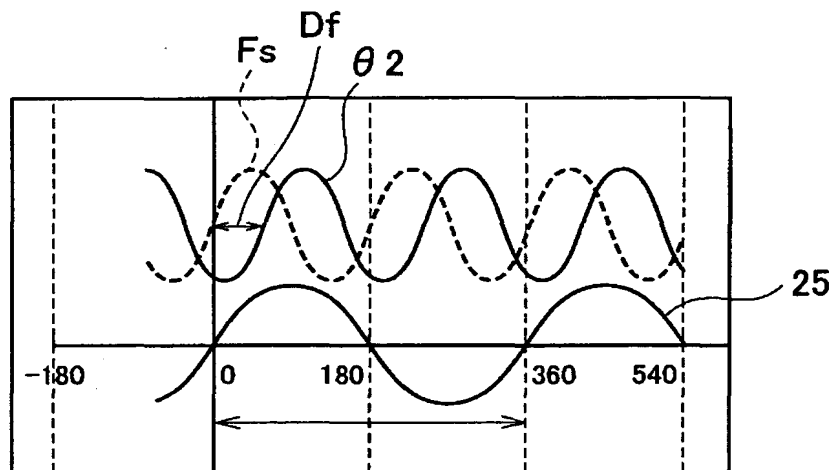
← イオンビームとホイールの  
回転軸が平行

← 円周方向の角度  
のパラツキを低減  
する注入条件

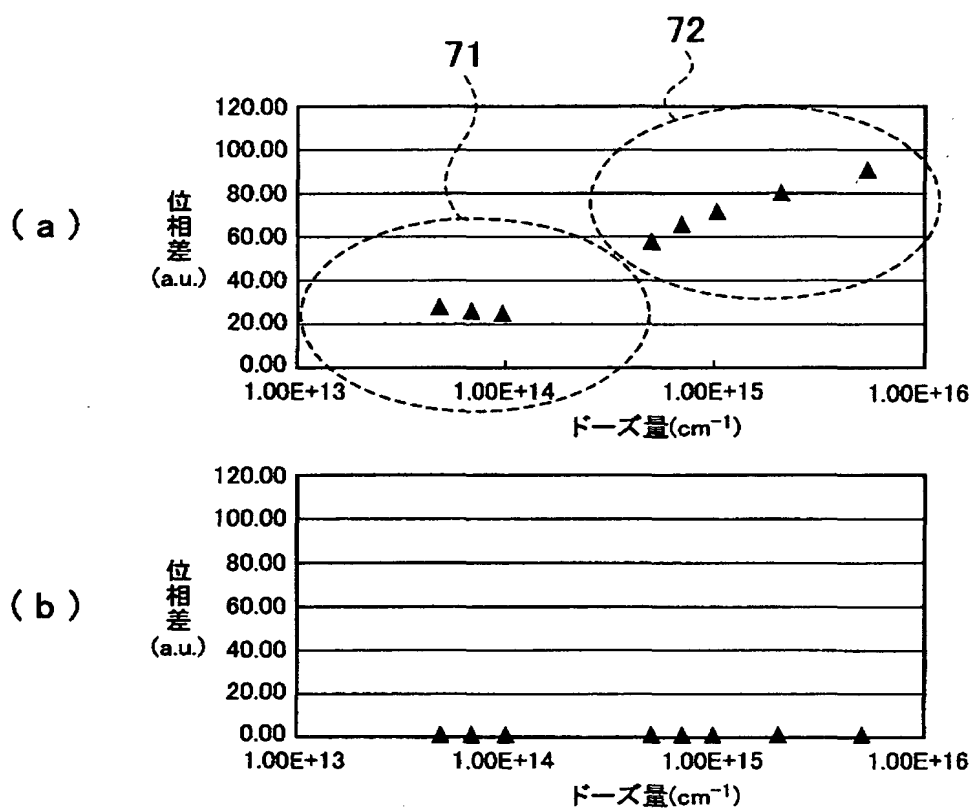
【図 2 4】

酸化膜 厚さ	イオン種	加速 エネルギー	ドーズ量	角度条件	イオン 注入装置	シガル面内均一性 ドーズ%換算
						標準偏差 (ドーズ)%
8nm	B	30	1E+15	-5°	装置B	1.39
8nm	B	30	1E+15	平行	装置B	1.34
8nm	B	30	1E+15	+2°	装置B	1.10
8nm	B	30	1E+15	+4°	装置B	0.92

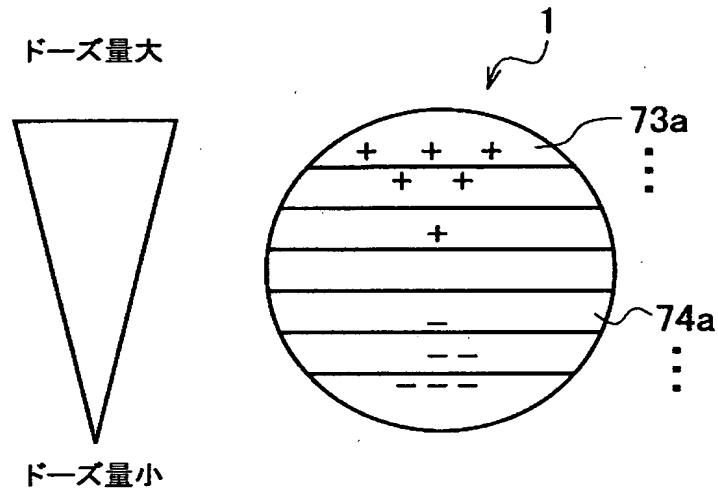
【図 25】



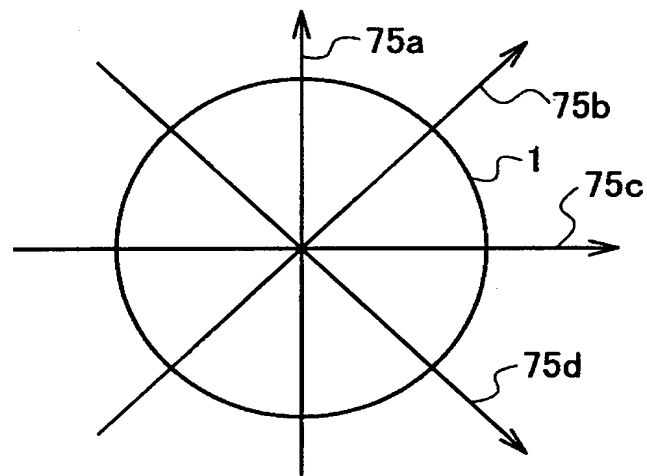
【図 26】



【図 2 7】



【図 2 8】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 高い測定精度及び測定再現性を成し得る半導体評価装置及び半導体評価方法を提供する。

【解決手段】 半導体ウェハ中に光キャリアを励起するための変調されたポンプ光を出力するポンプレーザと、プローブ光を半導体ウェハへ照射するプローブレーザと、半導体ウェハにより反射されたプローブ光を検出する検出器とを有する。

【選択図】 図 2

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000003078]

1. 変更年月日 2001年 7月 2日  
[変更理由] 住所変更  
住 所 東京都港区芝浦一丁目1番1号  
氏 名 株式会社東芝